

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2023.07.003

鄂尔多斯盆地南部凝灰岩地质特征及其对构造体制转换的制约

张天兵^{1,2}, 王建强^{1*}, 韩鹏³, 彭恒¹, 赵红格¹

ZHANG Tianbing^{1,2}, WANG Jianqiang^{1*}, HAN Peng³, PENG Heng¹, ZHAO Hongge¹

1.大陆动力学国家重点实验室,西北大学地质学系,陕西 西安 710069;

2.中国石化中原油田分公司勘探开发研究院,河南 濮阳 457001;

3.中国石油长庆油田分公司勘探开发研究院,低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,陕西 西安 710018

1.State Key Laboratory of Mainland Dynamics, Department of Geosciences, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China;

2.Exploration and Development Research Institute, Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang 457000, He'nan, China;

3.Exploration and Development Research Institute of PetroChina Changqing Oilfield Company, National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, Shaanxi, China

摘要:凝灰岩是火山活动的产物,沉积盆地中的凝灰岩层往往具等时性特点,是探索沉积盆地与周邻造山带构造演化的重要纽带。鄂尔多斯盆地显生宙火山活动不发育,但早古生代晚期和晚三叠世延长期地层中广泛分布凝灰岩夹层,且主要分布在盆地南部,暗示其与周邻造山带火山活动之间联系密切。前人对这2期凝灰岩分别开展了探讨,但对为何分布于盆地南部、具有怎样的成因联系、构造意义等缺乏综合研究与探讨。基于前人成果,对上述2期凝灰岩的展布特征、源岩判别、发育时限、区域构造背景等进行了系统研究。结果显示,鄂尔多斯盆地2期凝灰岩均发育于深水—较深水环境,且由南到北厚度逐渐减薄;元素地球化学判别显示出中—酸性岩浆性质,与火山岛弧喷发成因联系密切,主要发育时限分别集中于晚奥陶世桑比期—凯迪期(449~453 Ma)和中晚三叠世拉丁期—卡尼期(227~242 Ma),在时空上与鄂尔多斯盆地演化转折关键时期联系密切。结合区域构造分析认为,上述2期凝灰岩是秦岭造山带加里东期商丹洋盆和印支期勉略洋盆俯冲闭合过程中火山活动事件在相邻盆地的响应和记录,秦岭造山带构造演化对鄂尔多斯盆地南部早古生代海相盆地消亡和中生代内陆大型湖盆发育具有重要的控制作用。上述认识对深入探讨鄂尔多斯盆地南部和秦岭造山带显生宙期间长时间尺度盆地演化具有重要的指导意义。

关键词:鄂尔多斯盆地南部;凝灰岩;晚奥陶世;中晚三叠世;秦岭造山带

中图分类号:P534.42;P534.51;P588.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2023)07-1082-16

Zhang T B, Wang J Q, Han P, Peng H, Zhao H G. Geogical characteristics of tuffs and its constraints on the tectonic regimes transformation in the southern Ordos Basin. *Geological Bulletin of China*, 2023, 42(7): 1082-1097

Abstract: Tuff is the product of volcanic activity. Tuff layers in sedimentary basins are often isochronous, which is an important link for exploring the tectonic evolution of sedimentary basins and adjacent orogenic belts. The Phanerozoic magmatism in the Ordos Basin is very limited. However, in the late Early Paleozoic and Late Triassic Yanchang periods, there are many layers of tuff interlayers widely distributed in the southern basin. It indicates a close relationship between magmatic activities in adjacent orogenic belts. Predecessors have conducted a certain discussion on each of the two periods of tuff, but there is a lack of overall comprehensive research and analysis on

收稿日期:2021-04-14;修订日期:2021-09-27

资助项目:国家自然科学基金项目《鄂尔多斯盆地西南部三叠纪末沉积间断面发育过程及区域构造意义》(批准号:41972153)、《盆地晚期—后期差异隆升改造及其油气成藏效应——以鄂尔多斯盆地为例》(批准号:42230815)

作者简介:张天兵(1994-),男,硕士,从事盆地地质与油气勘探研究。E-mail:1610640683@qq.com

*通信作者:王建强(1981-),男,博士,副教授,从事盆地地质构造、油气勘探与低温热年代学教学和科研。E-mail:wjq@nww.edu.cn

why tuff is distributed in the southern part of the basin, and what genetic connections and tectonic significance it has. Based on previous research results, this paper systematically analyzes the distribution characteristics, source rock discrimination, development time and regional tectonic background of the above-mentioned two stage tuffs. The results show that the tuffs in the Ordos Basin are developed in deep water environments, gradually thinning from south to north. At the same time, geochemical discrimination reveals that they are all intermediate and acidic magmas, which is closely related to the origin of volcanic island arc eruption. The development time are respectively concentrated in the Late Ordovician Sandbian-Katian period (449~453 Ma) and the Late Triassic Ladinian-Carnian period (227~242 Ma), which are closely related to the key period of the Ordos Basin evolution in time and space. Combined with regional tectonics analysis, it is believed that the above-mentioned two stages of tuff development is the responses and records of volcanic events in adjacent basins during the subduction and closure of Caledonian Shangdan Ocean and Indosinian Mianlue Ocean in the Qinling Orogenic Belt. It shows that the tectonic evolution of the Qinling Orogenic Belt has an obvious control on the early Paleozoic marine basin disappearance and the development of the Mesozoic large intracontinental lake basin in the southern Ordos Basin. The above understanding has certain guiding significance for in-depth exploration of the long-term basin-mountain evolution and petroleum exploration during the Phanerozoic in the southern Ordos Basin and the Qinling Orogenic Belt.

Key words: southern Ordos Basin; Tuff; Late Ordovician; Middle-Late Triassic; Qinling Orogenic Belt

凝灰岩指火山喷发产生的火山灰(粒径一般小于 2 mm)经风力或水力搬运,随外力地质作用逐渐减弱,在沉积区形成的具凝灰结构或尘屑结构的岩石,属火成岩和沉积岩之间的过渡类型,具两者的双重特征(Qiu et al., 2014; 王建强等, 2017; 张本健等, 2019)。沉积盆地中的凝灰岩保留了源区矿物和岩石地球化学特征,记录了源区火山活动的相关信息,是古构造、古环境恢复的重要载体(Zhang et al., 2007; Yang et al., 2019),同时也是约束沉积地层时代、开展地层对比的良好工具(胡艳华等, 2009)和探索沉积盆地与相邻造山带耦合演化的纽带。

鄂尔多斯盆地位于华北克拉通西南部,与秦岭造山带毗邻。显生宙期间盆地演化较稳定,火山活动不明显,沉积地层中凝灰岩总体不发育,仅在早古生代晚期地层和中晚三叠世延长组 2 套地层中保留有凝灰岩夹层,且主体分布于盆地南部(Qiu et al., 2014; 吴素娟等, 2014),此外鲜有凝灰岩的报道。凝灰岩为何主要集中发育和保存于盆地早古生代和中生代地层,又为何集中分布在盆地南部,其分布特点和发育时限与周邻造山带(特别是秦岭造山带)和鄂尔多斯盆地的时空演化有何联系?纵观前人成果,多侧重某一时代或局部地区凝灰岩夹层的地球化学特征、发育时代、构造环境等研究(邱欣卫等, 2011; 陈诚等, 2012; 吴素娟等, 2014; 王振涛等, 2015a; Yuan et al., 2018),总体缺乏将其差异性分布、发育时限、区域构造意义等作为一个整体进行综合分析与研究。

基于此,本文在考察盆地南部凝灰岩发育地质

剖面的基础上,系统收集、整理和总结前人研究成果,其中包括 109 件主量元素、91 件微量及稀土元素地球化学资料,48 件凝灰岩年龄数据。从其展布规律、岩石学、地球化学、发育时限等方面对鄂尔多斯盆地南部早古生代晚期和中生代延长组 2 期凝灰岩特征进行了综合研究,进一步探讨了上述 2 个阶段盆地演化的区域动力学背景,从凝灰岩角度,探索周邻造山带对鄂尔多斯盆地发育演化的控制和影响。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地发育于华北克拉通太古宇—古元古界结晶基底之上,先后经历了中新元古代裂陷槽、早古生代克拉通陆表海、晚古生代克拉通拗陷、中生代内陆湖盆和新生代断陷盆地发育阶段(赵振宇等, 2012),为一多旋回叠合型沉积盆地(杨华等, 2006; 付玲等, 2020; 计波等, 2022; 张云等, 2022),期间虽遭受多期次改造,但盆地整体构造稳定,地层保存较完整,现今主体残留面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ (刘池洋等, 2006)。区域上,鄂尔多斯盆地地处不同构造单元的结合部,其南隔新生代渭河地堑与秦岭造山带接壤,西跨南北构造带,北隔河套盆地与阴山造山带相邻,东缘以吕梁山为界,表现为稳定的盆地本部被周邻新生代地堑系和活动造山带环绕的盆山相间的地貌格局(图 1)。

地质调查表明,鄂尔多斯盆地内火山活动不发育,但盆地南部早古生代晚期地层和中晚三叠世延长组中广泛分布诸多凝灰岩夹层(邱欣卫等, 2009;

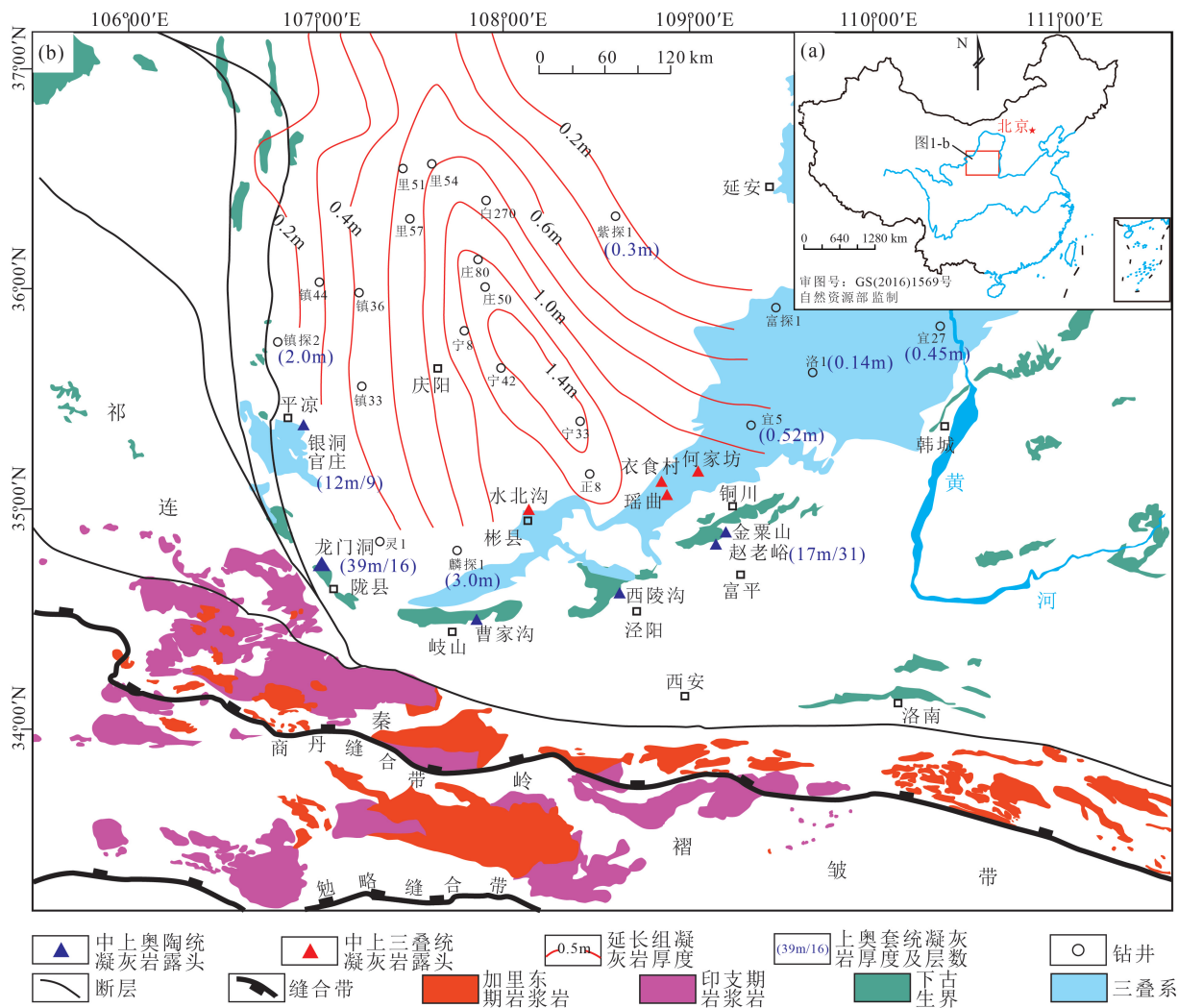


图1 鄂尔多斯盆地构造位置(a)和盆地南部与周邻构造带地质简图(b)

(据袁卫国,1995;邱欣卫等,2009;张文正等,2009;王振涛等,2015a)

Fig. 1 The tectonic location of the Ordos Basin (a) and geological sketch map of the southern and surrounding tectonic belts of the Ordos Basin (b)

张辉等,2014;王振涛等,2015a;张文等,2017)。其中,早古生代晚期凝灰岩层广泛发育于盆地南部、西南部的平凉组、赵老峪组、桃曲坡组等地层中,该套地层主体以海相页岩、硅质岩、碳酸盐岩沉积为主,并发育重力流、浊流、碎屑流等为代表的深水事件沉积(李文厚等,2012);中晚三叠世凝灰岩主要发育于盆地西南部的延长组,从延长组长₁段到长₇段皆有分布,且以长₇层最发育(邱欣卫等,2009)。延长期为鄂尔多斯中生代陆相盆地发育的鼎盛时期,该期地层也是盆地最重要的含油岩系,主要发育河湖相及三角洲相沉积(景辅泰等,2020),长₇期湖盆范围最广,水体最深,盆地南部以半深湖—

深湖相沉积为主(张文正等,2010)。同时,秦岭造山带大量研究表明,显生宙以来其总体经历了震旦纪—中奥陶世板块扩张,中晚奥陶世—晚泥盆世聚敛俯冲,晚泥盆世—中晚三叠世的碰撞及中生代陆内构造演化阶段。其中,中晚奥陶世和中晚三叠世是秦岭地区商丹洋盆及勉略洋盆闭合碰撞的主要阶段(Dong et al.,2011;2016)。

2 凝灰岩展布及岩石矿物特征

新鲜的火山凝灰物质可呈现绿色、红色、灰色等,沉积成岩及风化后往往呈现土黄色、灰绿色等,常发育细纹层且纹路较清晰,具明显平行层理,少

数单层具有粒序性(吴素娟等,2014)。野外露头常具有一定变形,暴露面多向岩层内凹陷,较醒目,富含粘土矿物,有光滑柔润感,并具有密度小、吸附性强、遇水膨胀等特点;镜下观察,凝灰岩一般由玻屑、晶屑及岩屑等组成(李泯星等,2020),填隙物往往为粘土杂基,还包括黑云母、磁铁矿、锆石、磷灰石等副矿物。

2.1 中—上奥陶统凝灰岩展布及岩石矿物

鄂尔多斯地区早古生代凝灰岩主要出露于盆地南部富平赵老峪组,蒲城金粟山组,耀县桃曲坡组,泾阳西陵沟和岐山曹家沟的平凉组(杨甫等,2015;王振涛等,2018);西南部陇县龙门洞、三道沟和平凉银洞官庄的平凉组(李振宏,2011;李振宏等,2015);盆地西北部乌海地区的乌拉力克组(吴素娟等,2017)等,均发育于中上奥陶统。凝灰岩主要以层状展布,大都呈黄绿色、灰黄色,少量呈紫红色,具微细水平层理,偶见粒序层理,单层厚度从不足 1 cm 至大于 10 cm,最厚者达 2 m 以上。如富平赵老

峪剖面,凝灰岩与硅质岩不等厚互层(图 2-a),凝灰岩夹层可达 30 余层,累计厚度约 17 m(袁卫国等,1995),泾阳西陵沟凝灰岩与薄层灰岩不等厚互层,单层厚度从几厘米到数十厘米不等,可见 26 余层(王振涛等,2015b),表面风化较严重(图 2-c)。盆地南部钻井资料也揭示有凝灰岩夹层发育,但横向上分布不稳定,层数较少,主要分布于中奥陶统马家沟组上部,厚度与古岩溶孔洞的发育程度具正相关性,推测与奥陶纪末期古岩溶面发育程度存在一定的联系(李振宏,2011)。综合露头观测、钻井资料及前人成果可以看到,盆地南部不同地区凝灰岩厚度与层数差异较大,总体显示出由南向北、由西南向东北累计厚度逐渐减薄的特点(图 1)。

岩石学研究表明,中—上奥陶统凝灰岩并非纯的火山物质,往往具有沉凝灰岩特点,且后期蚀变强烈,表现出斑脱岩的特点。镜下观察,主要由火山凝灰质和正常沉积物组成,凝灰质中晶屑为斜长

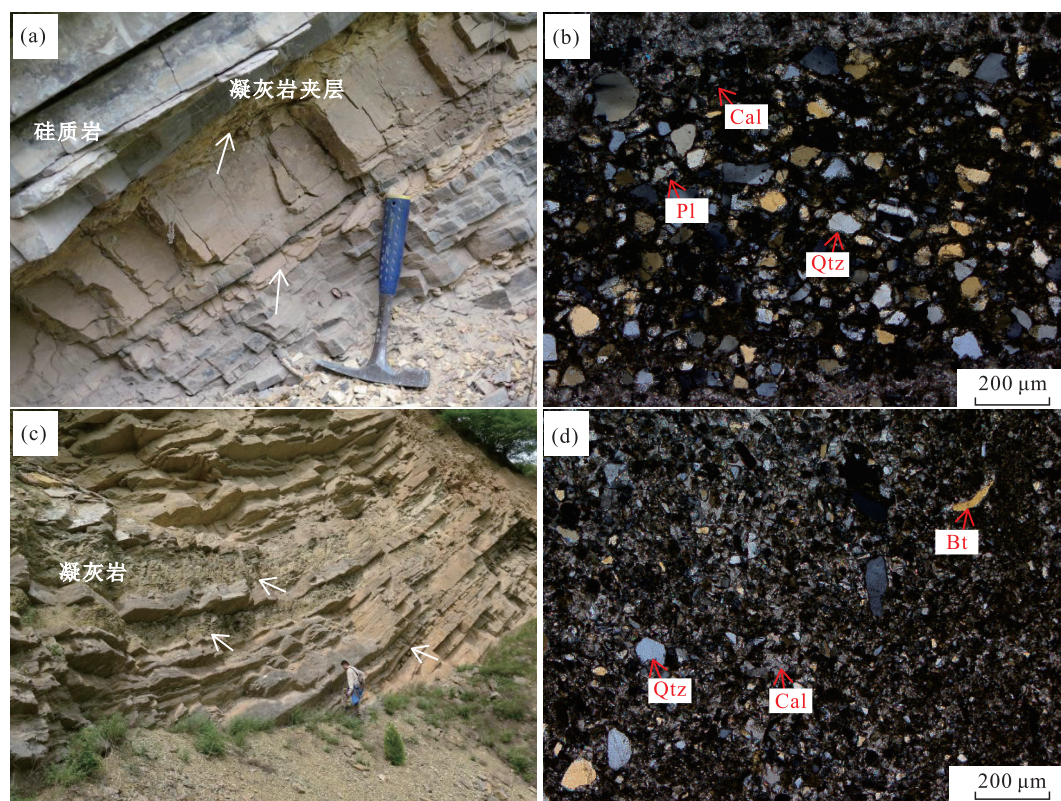


图 2 鄂尔多斯盆地南部中—上奥陶统凝灰岩夹层野外露头及镜下矿物特征

Fig. 2 Field outcrops and mineral characteristics of the Middle—Upper Ordovician tuff in southern Ordos Basin
a—富平赵老峪组凝灰岩与硅质岩互层;b—富平赵老峪组凝灰岩矿物特征(正交偏光);c—泾阳西陵沟平凉组凝灰岩夹层;
d—西陵沟平凉组凝灰岩矿物特征(正交偏光);Qtz—石英;Pl—斜长石;Cal—方解石;Bt—黑云母

石、钾长石、石英,呈棱角状,粒径一般为 0.05~0.25 mm,分选性较差;玻屑呈细骨棒状、楔形等,零星散状分布,消光明显,被粘土质、方解石交代;正常沉积物含有砂级碎屑,为长石、石英岩屑,大小一般为 0.1~0.25 mm,杂乱分布,填隙物为粘土杂基、钙质胶结(图 2-b、d)。

2.2 延长组凝灰岩展布及岩石矿物

延长组凝灰岩主要出露于盆地南部瑶曲衣食村,铜川霸王庄、何家坊,彬县水北沟,延长延河等剖面,多呈纹层状发育于油页岩、粉砂岩中,呈浅灰黄色、砖红色、浅灰色等,单层厚度一般为 50~100 mm,在瑶曲、彬县野外露头最大单层厚度超过 1.5 m(图 3-a、c)。因暴露地表,普遍已风化蚀变成粘土岩或凝灰质粘土岩、斑脱岩(图 3-b)。钻井资料揭示,在盆地西南部延长组长₁~长₈段中均有凝灰岩夹层发育,颜色鲜艳,呈紫红色、灰绿色、褐灰色、灰黄色、灰白色等,单层厚度从 3 mm~40 cm 不等,累计厚度 30 cm~2.5 m,以长₇期最发育,层数最多、厚度最大、分布范围最广。如正 8 井长₇段岩心凝灰岩纹层接近 200 层(张辉等,2014)。延长组

凝灰岩夹层展布特征前人已开展了较详细的研究,其分布面积可超 $3 \times 10^4 \text{ km}^2$ (邓秀芹等,2013)。以长₇期为例,凝灰岩厚度以瑶曲-正宁为中心,整体向北递减,呈北北西—南南东向展布,至志丹—延安一带几近消失(图 1)。

凝灰岩与砂、泥岩沉积作用同时进行,纯凝灰岩较少,以沉凝灰岩为主。岩石研究表明,延长组凝灰岩晶屑形状从棱角状到椭圆状都有,主要包括斜长石、黑云母、石英、钾长石等,石英颗粒为粒状,直径 0.02~0.5 mm;斜长石常为长条状,长度在 0.2~0.3 mm 之间,一般蚀变成粘土。玻屑多已蚀变成粘土岩,残留有玻璃状结构,但大部分棱角状未固结碎片已经消失,具明显消光性。岩屑直径约为 0.3 mm,为次圆状、溶蚀状等不规则状;绢云母为细鳞片状平行排列,褐铁矿受氧化作用为不规则细粒状,裂隙充填(图 3-b、d)。

3 元素地球化学与年代学特点

元素地球化学常用于分析矿物组分和岩石性质,开展原岩判别、构造环境分析等(万斌等,2013;

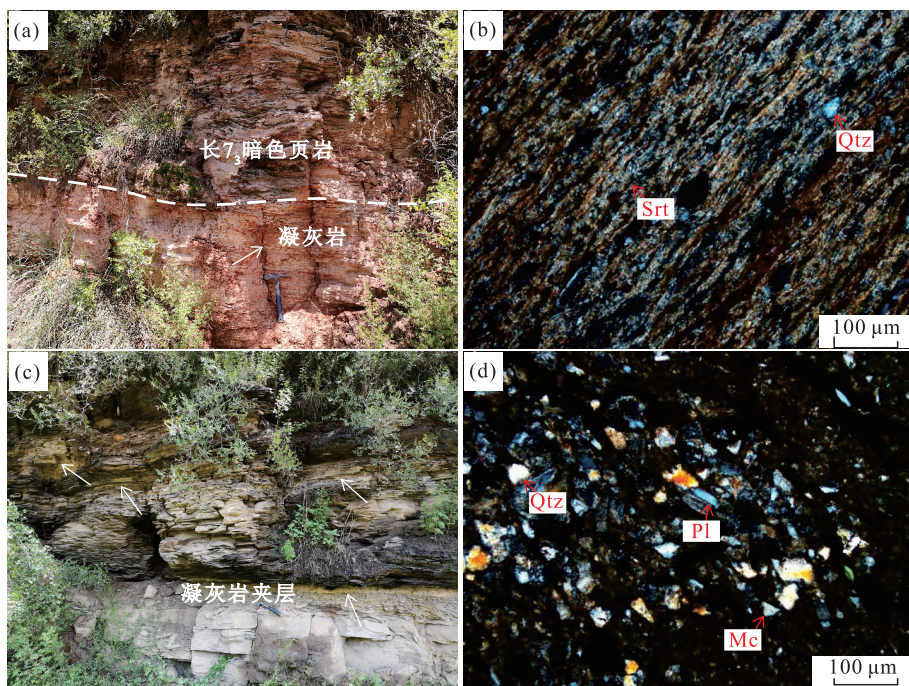


图 3 鄂尔多斯盆地南部延长组凝灰岩野外露头及镜下矿物特征

Fig. 3 Field outcrops and mineral characteristics of the Yanchang Formation tuff in southern Ordos Basin

a—彬县水北沟延长组黑色页岩下部厚层凝灰岩,已风化蚀变为粘土岩;b—彬县水北沟延长组凝灰岩蚀变强烈,绢云母呈平行排列(正交偏光);
c—彬县水北沟延长组凝灰岩与黑色页岩和粉砂岩互层;d—彬县水北沟延长组凝灰岩富含长英质岩屑、石英及微斜长石(正交偏光);
Qtz—石英;Pl—斜长石;Mc—微斜长石;Cal—方解石;Srt—绢云母

李子颖等,2022),尤其稀土、微量元素不易受风化、蚀变等作用影响,能更好地反映凝灰岩原岩特征。同时,随着定年技术的发展,凝灰岩的精确定年已成为确定盆地关键地质事件的重要依据,也是探讨大地构造环境和古气候环境的重要标尺(Kramer et al., 2001; Grevenitz et al., 2003; Astini et al., 2007; Foreman et al., 2008; Huff, 2008; Su et al., 2008),引起了国内外学者的广泛关注。近年来,围绕鄂尔多斯盆地中上奥陶统凝灰岩(杨甫等, 2015; 李振宏, 2011; 李振宏等, 2015; 王振涛等, 2018)及三叠系延长组凝灰岩(Xie, 2007; 王多云等, 2014; 邓胜徽等, 2018; Sun et al., 2019; Zhu et al., 2019; 袁珍等, 2019; 赵向东, 2020)已开展了大量元素地球化学及年代学研究。

3.1 中—上奥陶统凝灰岩地球化学特点与发育时限

本文遴选了中上奥陶统凝灰岩主量元素分析样品 40 件,微量元素 25 件,均为露头样品,主要分布于西南部平凉—陇县地区和南部富平—岐山地区(表 1;图 1)。从统计结果看,所有样品 SiO₂ 含量为 32.1%~80.5%,平均为 56.0%,总体显示出中酸性特点,但平凉—陇县地区有 3 件样品含量小于 53%,富平—岐山地区有 10 件样品小于 53%,具基

性岩特征; Al₂ O₃ 含量为 3.7%~24.7%,平均为 15.2%,接近大陆地壳平均含量; TFe₂ O₃ 含量较低,为 0.18%~4.6%,平均为 2.1%; MgO 含量为 0.7%~5.0%,平均为 3.4%,接近正常火成岩含量; K₂ O 含量为 0.4%~6.8%,平均为 3.7%,所有样品 K₂ O> Na₂ O,显示钾质特征, K₂ O / Na₂ O 值变化较大,介于 0.4~422 之间,平均为 73.6; TiO₂ 含量为 0.1%~0.8%,平均为 0.4%。

根据表 2 统计结果可以看到,中—上奥陶统凝灰岩 Σ REE = 58.4×10⁻⁶~342.9×10⁻⁶,平均为 201.2×10⁻⁶,高于澳大利亚页岩(182.0×10⁻⁶)和北美页岩(173.2×10⁻⁶)的平均含量; LREE 富集, (La/Sm)_n 值为 3.12~7.93,平均为 5.21, LREE / HREE 值为 6.4~16.0,平均为 10.9; (La / Yb)_n 值为 5.9~22.1,平均为 12.6,元素分馏明显,具明显的负 Eu 异常(δEu=0.32~0.90,平均为 0.58),但 Ce 异常不明显。从微量元素蛛网图可知(图 4-a),高场强元素 Th、U、Hf 等含量相对富集, Sr 元素表现明显的负异常,具有火成岩的特点(杨文龙等, 2016)。稀土元素球粒陨石标准化后配分曲线呈“V”字形右倾曲线特征(图 4-b),轻、重稀土元素分异明显。

表 1 凝灰岩主量元素综合统计

Table 1 Comprehensive statistical table of main elements in tuff

											%
时代	地 区	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	K ₂ O/(Al ₂ O ₃ -Na ₂ O)/ Na ₂ O	TiO ₂	文献来源
中上奥陶统	平凉—陇县 (n=13)	47.5~80.5 (59.4)	10.1~22.5 (16.2)	0.3~4.6 (2.3)	0.7~4.1 (3.2)	1.3~6.8 (4.9)	0.04~3.1 (0.6)	0.2~0.8 (0.5)	0.4~132.5 (39.0)	17.3~52.2 (36.3)	袁卫国, 1995; 李 文 厚 等, 1997; 李振宏, 2011; 陈诚等, 2012; 王 振 涛 等,2015b; 2018
	富平—岐山 (n=27)	32.1~75.9 (54.4)	3.7~24.7 (14.8)	0.2~4.2 (2.0)	0.9~5.0 (3.5)	0.4~6.3 (3.1)	0.01~1.9 (0.2)	0.1~0.8 (0.3)	1.4~422 (90.2)	17.2~92.1 (50.6)	
	全部数据 (n=40)	32.1~80.5 (56.0)	3.7~24.7 (15.2)	0.2~4.6 (2.1)	0.7~5.0 (3.4)	0.4~6.8 (3.7)	0.01~3.1 (0.3)	0.1~0.8 (0.4)	0.4~422 (73.6)	17.2~92.1 (46.0)	
	钻井样品 (53)	49.7~79.8 (59.6)	9.9~30.2 (22.7)	0.6~8.0 (2.4)	0.2~2.7 (1.5)	1.4~5.6 (3.8)	0.1~3.1 (1.2)	0.1~1.0 (0.4)	0.8~24.3 (4.8)		
延长组	露头样品 (n=16)	51.8~72.6 (60.7)	12.7~27.0 (18.9)	0.9~13.4 (4.4)	0.5~2.7 (1.4)	1.1~4.3 (3.2)	0.3~3.10 (1.24)	0.1~0.8 (0.3)	0.6~11.4 (4.9)		张文正等, 2009; 赖小东等, 2010; 邱 欣 卫 等, 2011; 2013; 王 建强 等, 2017; 高璞 等, 2017; 许锋等, 2019
	全部数据 (n=69)	49.7~79.8 (59.9)	9.9~30.2 (21.8)	0.6~13.4 (2.9)	0.2~2.7 (1.5)	1.1~5.6 (3.6)	0.1~3.1 (1.2)	0.1~1.0 (0.4)	0.6~24.3 (4.8)		

注:括号中值为平均值

表 2 凝灰岩微量元素综合统计
Table 2 Comprehensive statistical table of trace elements in tuff

10⁻⁶

时代	地区	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	Hf	Ta	Pb	Th	U	La	Ce	pr	Nd	文献来源
中奥陶统	平凉— 陇县	135.0~ 227.0	45.8~ 188.0	17.1~ 44.2	95.9~ 585.0	7.4~ 36.2	10.3~ 19.6	122.0~ 1303.0	2.8~ 13.4	0.5~ 2.7	12.0~ 106.2	12.2~ 55.4	3.5~ 14.4	36.0~ 78.2	65.5~ 158.8	7.2~ 15.9	26.1~ 56.7	袁卫国, 1995; 李文厚等, 1997; 李振宏, 2011; 陈诚等, 2012; 王振涛等, 2015b; 2018
	(n=11)	(184.5)	(104.1)	(30.2)	(273.7)	(15.6)	(14.1)	(492.0)	(6.7)	(1.0)	(34.9)	(28.9)	(7.9)	(54.3)	(106.3)	(11.4)	(40.0)	
	富平— 岐山	27.5~ 203.0	50.7~ 534.0	8.2~ 37.9	35.2~ 266.0	1.7~ 34.0	6.1~ 20.0	39.5~ 901.0	1.0~ 8.2	0.1~ 3.4	10.0~ 48.8	4.1~ 59.9	3.9~ 15.6	15.4~ 60.1	22.7~ 117.0	3.1~ 12.3	10.1~ 43.4	
	(n=14)	(101.2)	(180.6)	(21.8)	(125.8)	(11.4)	(14.0)	(268.2)	(3.7)	(0.9)	(22.4)	(18.4)	(6.9)	(38.1)	(73.9)	(7.9)	(27.5)	
	全部	27.5~ 227.0	45.8~ 534.0	8.2~ 44.2	35.2~ 585.0	1.7~ 36.2	6.1~ 20.0	39.5~ 1303.0	1.0~ 13.4	0.1~ 3.4	10.0~ 106.2	4.1~ 59.9	3.5~ 15.6	15.4~ 78.2	22.7~ 158.8	3.1~ 15.9	10.1~ 56.7	
	数据	(137.8)	(146.9)	(25.5)	(190.9)	(13.2)	(14.0)	(369.9)	(5.0)	(0.9)	(29.1)	(23.0)	(7.4)	(45.2)	(88.1)	(9.5)	(33.0)	
	(n=25)	(137.8)	(146.9)	(25.5)	(190.9)	(13.2)	(14.0)	(369.9)	(5.0)	(0.9)	(29.1)	(23.0)	(7.4)	(45.2)	(88.1)	(9.5)	(33.0)	
	岩心	65.7~ 256.0	50.3~ 781.0	6.4~ 56.5	64.0~ 685.5	6.7~ 27.5	2.1~ 17.5	260.0~ 2118.0	2.4~ 20.3	0.7~ 6.7	9.7~ 81.1	9.6~ 57.9	2.1~ 144.0	21.6~ 156.7	37.4~ 241.8	4.5~ 26.1	15.6~ 89.8	
	样品	(152.0)	(313.4)	(28.6)	(215.9)	(15.2)	(9.5)	(964.6)	(7.6)	(2.4)	(44.4)	(32.5)	(11.3)	(52.8)	(104.1)	(11.2)	(39.4)	
	(n=55)	(152.0)	(313.4)	(28.6)	(215.9)	(15.2)	(9.5)	(964.6)	(7.6)	(2.4)	(44.4)	(32.5)	(11.3)	(52.8)	(104.1)	(11.2)	(39.4)	
延长组	露头	59.4~ 238.0	84.6~ 438.0	14.1~ 54.4	82.8~ 301.0	5.5~ 21.5	4.6~ 9.2	272.0~ 1181.0	2.1~ 7.9	0.4~ 2.5	9.3~ 68.2	11.5~ 41.2	3.4~ 27.7	25.3~ 59.8	31.1~ 132.0	6.7~ 18.6	17.6~ 73.6	邱欣卫等, 2011; 2013; 王 建强等, 2017; 高璞等, 2017; 许锋等, 2019
	样品	(138.7)	(181.1)	(30.8)	(171.1)	(14.6)	(6.9)	(635.8)	(6.2)	(1.6)	(38.7)	(23.2)	(10.4)	(44.1)	(80.7)	(9.8)	(35.8)	
	(n=11)	(138.7)	(181.1)	(30.8)	(171.1)	(14.6)	(6.9)	(635.8)	(6.2)	(1.6)	(38.7)	(23.2)	(10.4)	(44.1)	(80.7)	(9.8)	(35.8)	
	全部	59.4~ 256.0	84.6~ 781.0	14.1~ 56.5	82.8~ 685.5	5.5~ 27.5	4.6~ 17.5	272.0~ 2118.0	2.1~ 20.3	0.4~ 6.7	9.3~ 81.8	11.5~ 57.9	3.4~ 144.0	25.3~ 456.7	31.1~ 241.8	6.7~ 26.1	17.6~ 89.8	
	数据	(149.2)	(294.8)	(294.8)	(208.4)	(15.1)	(9.1)	(909.8)	(7.3)	(2.2)	(43.8)	(31.0)	(11.1)	(51.3)	(100.2)	(11.0)	(38.8)	
	(n=66)	(149.2)	(294.8)	(294.8)	(208.4)	(15.1)	(9.1)	(909.8)	(7.3)	(2.2)	(43.8)	(31.0)	(11.1)	(51.3)	(100.2)	(11.0)	(38.8)	
	岩心	4.5~ 11.1	0.8~ 2.3	4.1~ 9.8	0.6~ 1.6	3.0~ 9.0	0.6~ 1.7	1.9~ 4.4	0.3~ 0.8	1.8~ 4.6	0.3~ 1.4	152.6~ 342.9	6.8~ 14.9	5.92~ 19.50	0.46~ 0.78	1.00~ 1.10	3.12~ 7.00	
	陇县	(7.2)	(1.3)	(6.4)	(1.0)	(5.8)	(1.1)	(3.2)	(0.5)	(3.4)	(0.7)	(242.7)	(10.7)	(12.53)	(0.59)	(1.05)	(5.11)	
	(n=11)	(7.2)	(1.3)	(6.4)	(1.0)	(5.8)	(1.1)	(3.2)	(0.5)	(3.4)	(0.7)	(242.7)	(10.7)	(12.53)	(0.59)	(1.05)	(5.11)	
	富平— 岐山	1.6~ 8.0	0.3~ 1.5	1.3~ 7.7	0.2~ 1.5	1.1~ 6.6	0.3~ 1.5	0.9~ 5.1	0.1~ 0.8	0.9~ 5.1	0.2~ 0.8	58.37~ 259.08	6.4~ 16.0	6.35~ 22.11	0.32~ 0.90	0.81~ 1.30	3.54~ 7.93	
	(n=14)	(4.9)	(0.9)	(4.5)	(0.7)	(3.8)	(0.8)	(2.4)	(0.4)	(2.4)	(0.4)	(168.6)	(11.0)	(12.60)	(0.56)	(1.03)	(5.30)	
陶统	全部	1.6~ 11.1	0.3~ 2.3	1.3~ 9.8	0.2~ 1.6	1.1~ 9.0	0.3~ 1.7	0.9~ 5.1	0.1~ 0.8	0.9~ 5.1	0.2~ 1.4	58.4~ 342.9	6.4~ 16.0	5.92~ 22.11	0.32~ 0.90	0.81~ 1.30	3.12~ 7.93	袁卫国, 1995; 李文厚等, 1997; 李振宏, 2011; 陈诚等, 2012; 王振涛等, 2015b; 2018
	数据	(5.9)	(1.1)	(5.3)	(0.8)	(4.7)	(0.9)	(2.8)	(0.4)	(2.8)	(0.5)	(201.2)	(10.9)	(12.60)	(0.58)	(1.04)	(5.21)	
	(n=25)	(5.9)	(1.1)	(5.3)	(0.8)	(4.7)	(0.9)	(2.8)	(0.4)	(2.8)	(0.5)	(201.2)	(10.9)	(12.60)	(0.58)	(1.04)	(5.21)	
	岩心	3.0~ 15.7	0.2~ 2.7	2.6~ 11.8	0.4~ 1.8	1.5~ 10.2	0.3~ 2.2	0.7~ 6.5	0.1~ 0.8	0.6~ 5.3	0.1~ 0.8	99.8~ 550.2	5.9~ 48.7	4.05~ 52.52	0.15~ 1.23	0.79~ 2.08	2.98~ 8.03	
	样品	(7.3)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.7)	(0.4)	(235.4)	(17.6)	(15.78)	(0.55)	(1.06)	(4.72)	
	(n=55)	(7.3)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.7)	(0.4)	(235.4)	(17.6)	(15.78)	(0.55)	(1.06)	(4.72)	
	露头	4.9~ 12.0	0.2~ 2.0	4.2~ 8.5	0.7~ 1.4	3.8~ 8.1	0.7~ 1.8	1.5~ 4.6	0.2~ 0.8	1.5~ 4.9	0.2~ 0.8	124.9~ 315.0	7.9~ 21.6	6.70~ 16.15	0.15~ 0.72	0.45~ 1.12	2.93~ 5.14	
	样品	(6.9)	(1.1)	(6.1)	(0.9)	(5.1)	(1.1)	(3.0)	(0.5)	(3.1)	(0.5)	(198.7)	(13.2)	(10.65)	(0.50)	(0.95)	(4.25)	
	(n=11)	(6.9)	(1.1)	(6.1)	(0.9)	(5.1)	(1.1)	(3.0)	(0.5)	(3.1)	(0.5)	(198.7)	(13.2)	(10.65)	(0.50)	(0.95)	(4.25)	
	全部	3.0~ 15.7	0.2~ 2.7	2.6~ 11.8	0.4~ 1.8	1.5~ 1.0	0.3~ 2.2	0.7~ 6.5	0.1~ 0.8	0.6~ 5.3	0.1~ 0.8	99.8~ 550.2	5.9~ 48.7	4.05~ 52.52	0.15~ 1.23	0.45~ 2.08	2.93~ 8.03	
	数据	(7.2)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.8)	(0.4)	(229.3)	(16.9)	(14.92)	(0.54)	(1.04)	(4.64)	
	(n=66)	(7.2)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.8)	(0.4)	(229.3)	(16.9)	(14.92)	(0.54)	(1.04)	(4.64)	
时代	地区	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE	LREE/ HREE	(La/ Yb) _n	δEu	δCe	(La/ Sm) _n	文献来源
中奥陶统	平凉— 陇县	4.5~ 11.1	0.8~ 2.3	4.1~ 9.8	0.6~ 1.6	3.0~ 9.0	0.6~ 1.7	1.9~ 4.4	0.3~ 0.8	1.8~ 4.6	0.3~ 1.4	152.6~ 342.9	6.8~ 14.9	5.92~ 19.50	0.46~ 0.78	1.00~ 1.10	3.12~ 7.00	袁卫国, 1995; 李文厚等, 1997; 李振宏, 2011; 陈诚等, 2012; 王振涛等, 2015b; 2018
	(n=11)	(7.2)	(1.3)	(6.4)	(1.0)	(5.8)	(1.1)	(3.2)	(0.5)	(3.4)	(0.7)	(242.7)	(10.7)	(12.53)	(0.59)	(1.05)	(5.11)	
	富平— 岐山	1.6~ 8.0	0.3~ 1.5	1.3~ 7.7	0.2~ 1.5	1.1~ 6.6	0.3~ 1.5	0.9~ 5.1	0.1~ 0.8	0.9~ 5.1	0.2~ 0.8	58.37~ 259.08	6.4~ 16.0	6.35~ 22.11	0.32~ 0.90	0.81~ 1.30	3.54~ 7.93	
	(n=14)	(4.9)	(0.9)	(4.5)	(0.7)	(3.8)	(0.8)	(2.4)	(0.4)	(2.4)	(0.4)	(168.6)	(11.0)	(12.60)	(0.56)	(1.03)	(5.30)	
	全部	1.6~ 11.1	0.3~ 2.3	1.3~ 9.8	0.2~ 1.6	1.1~ 9.0	0.3~ 1.7	0.9~ 5.1	0.1~ 0.8	0.9~ 5.1	0.2~ 1.4	58.4~ 342.9	6.4~ 16.0	5.92~ 22.11	0.32~ 0.90	0.81~ 1.30	3.12~ 7.93	
	数据	(5.9)	(1.1)	(5.3)	(0.8)	(4.7)	(0.9)	(2.8)	(0.4)	(2.8)	(0.5)	(201.2)	(10.9)	(12.60)	(0.58)	(1.04)	(5.21)	
	(n=25)	(5.9)	(1.1)	(5.3)	(0.8)	(4.7)	(0.9)	(2.8)	(0.4)	(2.8)	(0.5)	(201.2)	(10.9)	(12.60)	(0.58)	(1.04)	(5.21)	
	岩心	3.0~ 15.7	0.2~ 2.7	2.6~ 11.8	0.4~ 1.8	1.5~ 10.2	0.3~ 2.2	0.7~ 6.5	0.1~ 0.8	0.6~ 5.3	0.1~ 0.8	99.8~ 550.2	5.9~ 48.7	4.05~ 52.52	0.15~ 1.23	0.79~ 2.08	2.98~ 8.03	
	样品	(7.3)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.7)	(0.4)	(235.4)	(17.6)	(15.78)	(0.55)	(1.06)	(4.72)	
	(n=55)	(7.3)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.7)	(0.4)	(235.4)	(17.6)	(15.78)	(0.55)	(1.06)	(4.72)	
延长组	露头	4.9~ 12.0	0.2~ 2.0	4.2~ 8.5	0.7~ 1.4	3.8~ 8.1	0.7~ 1.8	1.5~ 4.6	0.2~ 0.8	1.5~ 4.9	0.2~ 0.8	124.9~ 315.0	7.9~ 21.6	6.70~ 16.15	0.15~ 0.72	0.45~ 1.12	2.93~ 5.14	邱欣卫等, 2011; 2013; 王 建强等, 2017; 高璞等, 2017; 许锋等, 2019
	样品	(6.9)	(1.1)	(6.1)	(0.9)	(5.1)	(1.1)	(3.0)	(0.5)	(3.1)	(0.5)	(198.7)	(13.2)	(10.65)	(0.50)	(0.95)	(4.25)	
	(n=11)	(6.9)	(1.1)	(6.1)	(0.9)	(5.1)	(1.1)	(3.0)	(0.5)	(3.1)	(0.5)	(198.7)	(13.2)	(10.65)	(0.50)	(0.95)	(4.25)	
	全部	3.0~ 15.7	0.2~ 2.7	2.6~ 11.8	0.4~ 1.8	1.5~ 1.0	0.3~ 2.2	0.7~ 6.5	0.1~ 0.8	0.6~ 5.3	0.1~ 0.8	99.8~ 550.2	5.9~ 48.7	4.05~ 52.52	0.15~ 1.23	0.45~ 2.08	2.93~ 8.03	
	数据	(7.2)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.8)	(0.4)	(229.3)	(16.9)	(14.92)	(0.54)	(1.04)	(4.64)	
	(n=66)	(7.2)	(1.1)	(6.0)	(0.9)	(5.0)	(1.1)	(3.0)	(0.4)	(2.8)	(0.4)	(229.3)	(16.9)	(14.92)	(0.54)	(1.04)	(4.64)	
	岩心	4.5~ 11.1	0.8~ 2.3	4.1~ 9.8	0.6~ 1.6	3.0~ 9.0	0.6~ 1.7	1.9~ 4.4	0.3~ 0.8	1.8~ 4.6	0.3~ 1.4	152.6~ 342.9	6.8~ 14.9	5.92~ 19.50	0.46~ 0.78	1.00~ 1.10	3.12~ 7.00	
	陇县	(7.2)	(1.3)	(6.4)	(1.0)	(5.8)	(1.1)	(3.2)	(0.5)	(3.4)	(0.7)	(242.7)	(10.7)	(12.53)	(0.59)	(1.05)	(5.11)	
	(n=11)	(7.2)	(1.3)	(6.4)	(1.0)	(5.8)	(1.1)	(3.2)	(0.5)	(3.4)	(0.7)	(242.7)	(10.7)	(12.53)	(0.59)	(1.05)	(5.11)	
	富平— 岐山	1.6~ 8.0	0.3~ 1.5	1.3~ 7.7	0.2~ 1.5	1.1~ 6.6	0.3~ 1.5	0.9~ 5.1	0.1~ 0.8	0.9~ 5.1	0.2~ 0.8	58.37~ 259.08	6.4~ 16.0	6.35~ 22.11	0.32~ 0.90	0.81~ 1.30	3.54~ 7.93	

注:括号中值为平均值

利用 TAS(全碱 SiO₂-(Na₂O+K₂O) 化学分类)图解进行源岩判别,可见中—上奥陶统样品点落入区域较分散,在中酸性、基性,甚至超基性岩浆系列均有分布,特别是富平—岐山地区的样品(图 5—

a)。考虑到凝灰岩后期发生风化和蚀变作用,部分碱质元素可能被活化迁移等影响,TAS 图解判别有一定的

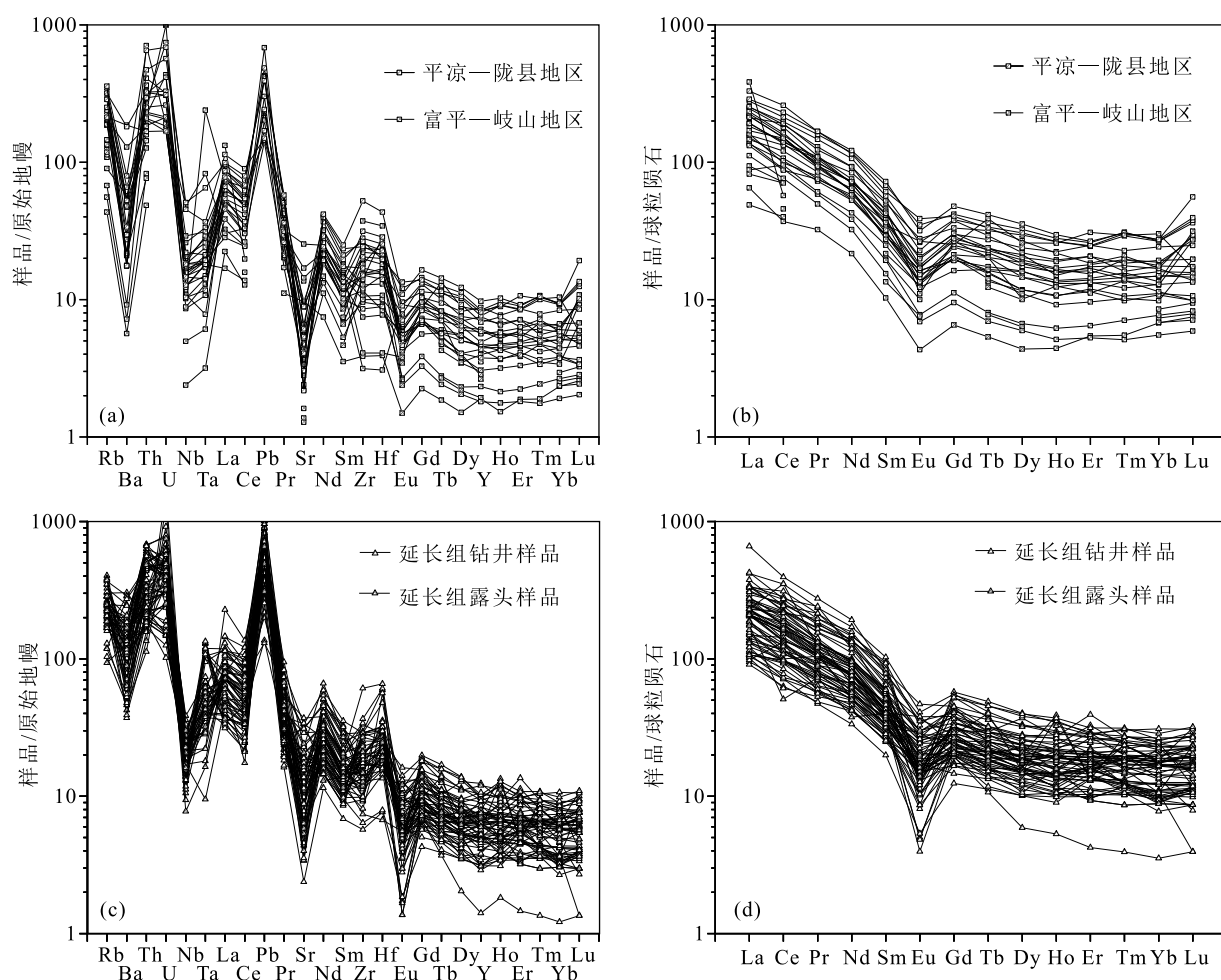


图 4 鄂尔多斯盆地凝灰岩微量元素原始地幔标准化蛛网图与稀土元素球粒陨石标准化配分图

Fig. 4 Standardized spider diagram of the primitive mantle of trace elements and chondrite normalized rare earth element distribution pattern of tuff in Ordos Basin

a—中上奥陶统凝灰岩微量元素蛛网图;b—中上奥陶统凝灰岩稀土元素配分图;c—延长组凝灰岩微量元素蛛网图;d—延长组凝灰岩稀土元素配分图(标准化值据 Sun et al., 1989)

面安山岩、流纹岩和安山岩等中、酸性岩浆系列(图 5-b),表明中—上奥陶统凝灰岩物质来源以中、酸性岩浆为主。

前人对盆地南部富平赵老峪、耀县桃曲坡、泾阳西陵沟、平凉银洞官庄、岐山曹家沟剖面等凝灰岩夹层开展了大量年代学研究(表 3),采用的定年方法以 LA-ICP-MS 及 SHRIMP 锆石 U-Pb 定年为主,对该期凝灰岩的形成时限有了较好的约束。综合已发表的年代学数据看,早古生代凝灰岩样品锆石 U-Pb 年龄分布介于 $444 \pm 6.2 \sim 465.8 \pm 3$ Ma (22 件样品)之间,主体集中于 449~453 Ma (图 6-a),表明其主要发育于晚奥陶世桑比期—凯迪期。

3.2 延长组凝灰岩地球化学特点与发育时限

本文同时收集了延长组凝灰岩主量元素样品 69 件、微量元素样品 66 件,均位于盆地西南部,主要包括钻井岩心和露头样品,其中 85% 以上为延长组长 7 段凝灰岩样品。从结果看(表 1),延长组凝灰岩样品 SiO_2 含量为 49.7%~79.8%,平均为 59.9%,显示出中酸性特点; Al_2O_3 含量总体为 9.9%~30.2%,平均为 21.8%,相对较高; TFe_2O_3 含量为 0.6%~13.4%,平均为 2.9%; MgO 含量为 0.2%~2.7%,平均为 1.5%; K_2O 含量为 1.1%~5.6%,平均为 3.6%,所有样品 $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$,显示了其钾质特征, $\text{K}_2\text{O} / \text{Na}_2\text{O}$ 值为 0.6~24.3,平均为 4.8; TiO_2 含量为 0.1%~1.0%,平均为 0.4%。

表 3 鄂尔多斯盆地凝灰岩锆石 U-Pb 年龄结果
Table 3 Summary of zircon U-Pb age results of tuff in southern Ordos Basin

时代	样品位置	采样层位	定年方法	年龄/Ma(锆石颗粒数)	数据来源
中 上 奥 陶 统	泾阳西陵沟	金粟山组	SHRIMP	451.1±4.9 Ma(<i>n</i> =12)	陈诚等,2012
				465.8±8.3 Ma(<i>n</i> =4)	
	富平赵老峪	金粟山组	SHRIMP	452.1±5.1 Ma(<i>n</i> =11)	
				457.5±5.1 Ma(<i>n</i> =12)	
				454±4.3 Ma(<i>n</i> =31)	
	泾阳西陵沟	平凉组	LA-ICP-MS	452±5 Ma(<i>n</i> =22)	王振涛等,2015b
				449±3 Ma(<i>n</i> =34)	
				457±3 Ma(<i>n</i> =15)	
	甘肃银洞官庄	平凉组	LA-ICP-MS	450±2.0 Ma(<i>n</i> =10)	
				451±1.0 Ma(<i>n</i> =9)	
	富平赵老峪	赵老峪组	SHRIMP	453.2±6.9 Ma(<i>n</i> =13)	吴素娟等,2014
	乌海老石旦	乌拉力克组	LA-ICP-MS	454.9±3.4 Ma(<i>n</i> =6)	吴素娟等,2017
			SHRIMP	456.4±4.2 Ma(<i>n</i> =8)	
	富平赵老峪	赵老峪组	LA-ICP-MS	460±7.1 Ma(<i>n</i> =21)	黄栋等,2016
	富平赵老峪	赵老峪组	SHRIMP	451.6±6.1 Ma(<i>n</i> =12)	李振宏,2011;
	甘肃银洞官庄	平凉组	LA-ICP-MS	453.4±1.5 Ma(<i>n</i> =30)	
	陕 24 井	马家沟顶	LA-ICP-MS	450.4±3.9 Ma	李振宏等,2015
	岐山曹家沟	平凉组	LA-ICP-MS	454 Ma(<i>n</i> =80)	
	平凉太统山	平凉组	LA-ICP-MS	462.8±3.8 Ma(<i>n</i> =71)	杨甫等,2015
				444±6.2 Ma(<i>n</i> =23)	
	富平赵老峪	赵老峪组	LA-ICP-MS	451.3±3.3 Ma	
中 上 三 叠 统 延 长 组	耀县桃曲坡	桃曲坡组	LA-ICP-MS	453.7±3.3 Ma(<i>n</i> =31)	王振涛等,2018
	铜川金锁关	延长组	LA-ICP-MS	240.7±0.75 Ma	Xie,2007
	铜川何家坊	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	226.5±1.6 Ma(<i>n</i> =24)	王建强等,2017
				229.7±2.2 Ma(<i>n</i> =21)	
	W8 井	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	221.8±2.0 Ma(<i>n</i> =21)	邓秀芹等,2013
	N33 井	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	228.2±2.0 Ma(<i>n</i> =27)	
	宁 36 井	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	236.1±2.7 Ma(<i>n</i> =15)	张辉等,2014
	正 8 井	延长组长 7 段		234.3±2.8 Ma(<i>n</i> =12)	
	正 9 井	延长组长 7 段		234.9±2.6 Ma(<i>n</i> =14)	
	罗 36 井	延长组长 7 底	SHRIMP	239.7±1.7 Ma(<i>n</i> =13)	王多云等,2014
	庄 211 井	延长组长 7 底		241.3±2.4 Ma(<i>n</i> =11)	
	何 2 井	延长组长 7 底	LA-ICP-MS	239.8±2.0 Ma(<i>n</i> =27)	张文等,2017
	崇信汭河	延长组长 7 底	ID-TIMS	239.0±1.8 Ma(<i>n</i> =4)	邓胜徽等,2018
	盆地西南部	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	221.8~228.2 Ma	陈朝兵等,2019
	H3 井	延长组长 7 底	LA-ICP-MS	241.0±1.4 Ma	袁珍等,2019
				234.1±2.4 Ma(<i>n</i> =20)	
	宜君云梦乡	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	234.8±2.1 Ma(<i>n</i> =9)	Sun et al. ,2019
				236.0±1.7 Ma(<i>n</i> =16)	
	瑶曲衣食村	延长组长 7 段	LA-ICP-MS	243.2±3.2 Ma(<i>n</i> =38)	Zhu et al. ,2019
				239.7±2.7 Ma(<i>n</i> =38)	
	瑶曲衣食村	延长组长 7 段	ID-TIMS	241.06±0.12 Ma(<i>n</i> =4)	
				241.56±0.093 Ma(<i>n</i> =5)	
	铜川霸王庄	延长组	LA-ICP-MS	240.3±1.4 Ma(<i>n</i> =9)	赵向东等,2020
	铜川马庄			240.9±1.0 Ma(<i>n</i> =7)	
	瑶曲衣食村	延长组	LA-ICP-MS	242.1±0.9 Ma(<i>n</i> =18)	
				240.1±0.9 Ma(<i>n</i> =14)	

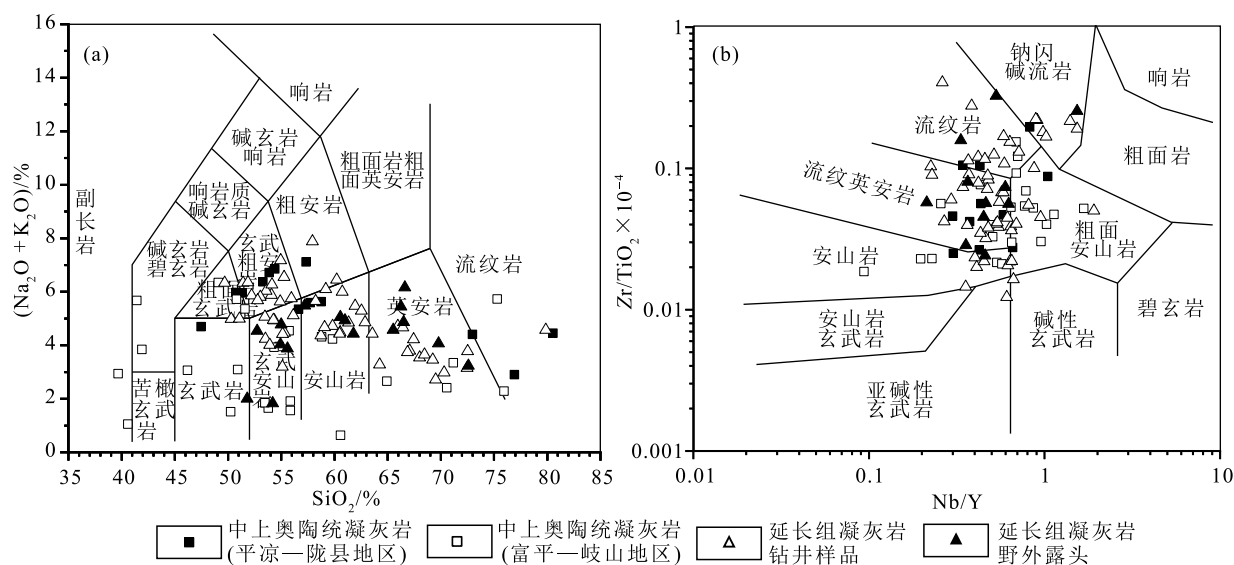


图 5 鄂尔多斯盆地南部两期凝灰岩原岩特征判别图解

Fig. 5 Discriminant diagrams of the characteristics of two-stage tuff protoliths in southern Ordos Basin

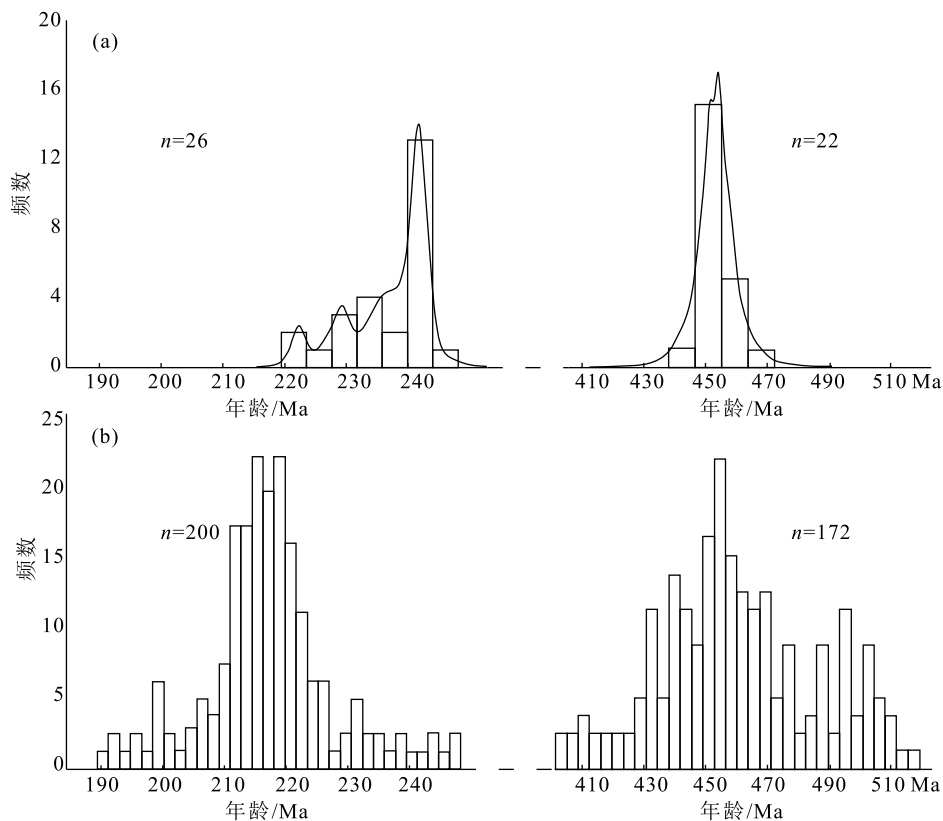
a— $\text{SiO}_2-(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ 判别图解 (底图据 Maitre et al., 1984); b— $\text{Nb}/\text{Y}-\text{Zr}/\text{TiO}_2 \times 10^{-4}$ 判别图解 (底图据 Winchester et al., 1977)

图 6 鄂尔多斯盆地南部凝灰岩及秦岭地区岩体锆石 U-Pb 年龄综合对比图

Fig. 6 Comprehensive comparison maps of zircon U-Pb ages of tuff in southern Ordos Basin and rock mass in Qinling area

a—中上奥陶统和延长组凝灰岩锆石 U-Pb 年龄频率分布图 (据表 3); b—北秦岭加里东期和印支期岩体锆石 U-Pb 年龄频率分布图

(陈丹玲等, 2004; 苏犁等, 2004; 李惠民等, 2006; 杨钊等, 2006; 裴先治等, 2007; 王洪亮等, 2007; 闫全人等, 2007; 陈隽璐等,

2008; 刘军锋等, 2009; Dong et al., 2011; 2016; 赵姣等, 2012; 张成立等, 2013; 王建强等, 2017)

根据表 2 统计结果可以看到,延长组凝灰岩 $\Sigma\text{REE}=99.8\times10^{-6}\sim550.2\times10^{-6}$, 平均为 229.3×10^{-6} , LREE/HREE 值为 5.9~48.7 之间,平均为 16.9,亦表现出 LREE 富集、HREE 相对亏损的显著特征,稀土元素配分曲线右倾型特征更显著(图 4-d), $(\text{La}/\text{Yb})_n=4.05\sim52.52$,平均为 14.92, $(\text{La}/\text{Sm})_n=2.93\sim8.03$,平均为 4.64, $\delta\text{Eu}=0.15\sim1.23$,平均为 0.54,元素分馏特征更明显。TAS 判别图解显示,延长组凝灰岩主要落入英安岩、安山岩、玄武粗安岩和玄武安山岩区域(图 5-a),而在 $(\text{Zr}/\text{TiO}_2)-\text{Nb}/\text{Y}$ 图解中,主要落入流纹英安岩、流纹岩、安山岩和钠闪碱流岩区域(图 5-b),表明延长组凝灰岩物质来源以中、酸性岩浆为主。

围绕延长组长 7 段凝灰岩夹层,前人先后对盆地南部铜川何家坊、瑶曲衣食村及西南部崇信地区露头样品,盆地南部正宁一带钻井样品,开展了年代学研究(表 3),采用的定年方法包括 LA-ICP-MS、SHRIMP 及 ID-TIMS 锆石 U-Pb 定年。综合已发表的延长组凝灰岩样品年龄数据,锆石 U-Pb 年龄总体介于 $221.8\pm2.0\sim243.2\pm3.2\text{ Ma}$ ($n=25$) 之间,年龄较分散,主要集中于中三叠世拉丁期($239\sim242\text{ Ma}$, $n=14$)、晚三叠世卡尼期($227\sim236\text{ Ma}$, $n=10$) 2 个年龄段(图 6-a),表明延长组凝灰岩总体发育于中三叠世晚期—晚三叠世早期。

4 讨 论

4.1 两期凝灰岩发育的构造背景

根据化学成分来判别岩浆起源的大地构造背景的方法最初由 Pearce et al. (1973) 提出,其先后建立了区别于不同大地构造背景下的玄武质、花岗质岩石等判别图解(Pearce, 1982; Pearce et al., 1984; 1995),后其他学者在其基础上,进一步提出了诸多判别图解(Mullen et al., 1983; Cabanis, 1989),可根据不同元素特征对凝灰岩发育的大地构造环境给予一定的指示作用。本文应用以高场强元素为变量提出的 Ta-Hf-Th 三角图解、以较稳定微量元素提出的 Nb-Y-La 图解、针对花岗质岩石提出的 Nb-Y 图解、针对火山岩提出的 TiO_2-Zr 图解和以元素比值为变量提出的 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 、 $(\text{Th}/\text{Yb})-(\text{Nb}/\text{Yb})$ 构造环境判别图解,对搜集的中晚奥陶世和延长组凝灰岩样品分别开展了构造环境判别(图 7)。

结果表明,在 Ta-Hf-Th 三角判别图解(图 7-a)中,2 期凝灰岩样品点几乎都落入岛弧火山玄武岩区域,在 Nb-Y-La 三角判别图解中大部分样品点落入火山弧钙碱性玄武岩区(图 7-b);在 $\text{Rb}-(\text{Y}+\text{Nb})$ 和 Nb-Y 图解中,2 期凝灰岩样品点大都落入火山弧花岗岩,少部分落入板内花岗岩区域(图 7-c、d);在 TiO_2-Zr 图解中,大部分样品点落入岛弧岩浆环境区域,少量落入板内岩浆环境区域(图 7-e),在 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ 图解中,大部分样品点落入于大陆弧岩浆区域(图 7-f)。其中,基于不活动元素比值的 $\text{Th}/\text{Yb}-\text{Nb}/\text{Yb}$ 图解和高场强元素 Ta-Hf-Th 图解,其在变质和蚀变过程中相对稳定,能够消除凝灰岩风化、蚀变过程中对元素本身的影响,在火山沉积物原岩大地构造环境判别上具有更好的可信度(Pearce et al., 1995)。

综上所述,所有图解判别显示,这 2 期凝灰岩的主体形成均与火山弧构造背景密切相关,与前人通过不同方式判别的结果一致(陈诚等, 2012; 王振涛等, 2015b),也与世界上已发现的绝大多数钾质斑脱岩(沉凝灰岩)原岩的产出背景为火山弧环境、板内环境的结论较一致(胡艳华等, 2009)。

4.2 区域构造意义

上述对鄂尔多斯盆地南部凝灰岩地质特征的综合分析表明,2 期凝灰岩主要赋存于盆地南部中—上奥陶统薄层碳酸盐岩、硅质岩,延长组油页岩、薄层粉砂岩等为代表的较深水体环境,同时均表现出沉凝灰岩特点,发生不同程度的蚀变,晶屑、玻屑特征明显;凝灰岩厚度呈现由南向北逐渐减薄的特征(图 1);主量元素总体显示出钾质中酸性岩浆特点,微量元素原始地幔蛛网图均显示 Nb、Ta 元素亏损,反映岩浆成因与板块俯冲时地壳物质参与岩浆相关过程(Jiang et al., 2012);稀土元素亦表现出 LREE 富集, HREE 相对亏损,负 Eu 异常的特征。值得注意的是,2 期凝灰岩样品都没有明显的负 Ce 异常,表明凝灰岩形成于缺氧环境(张辉等, 2014),这与凝灰岩赋存地层显示的深水环境相佐证。同时,原岩判别表明,2 期凝灰岩原岩均以中酸性岩浆为主,主体形成于火山弧构造背景;大量年龄数据证据进一步明确了这 2 期凝灰岩分别发育于晚奥陶世桑比期—凯迪期($449\sim453\text{ Ma}$)和中晚三叠世拉丁期—卡尼期($227\sim242\text{ Ma}$)。凝灰岩作为沉积盆地古构造、古环境研究的重要载体和

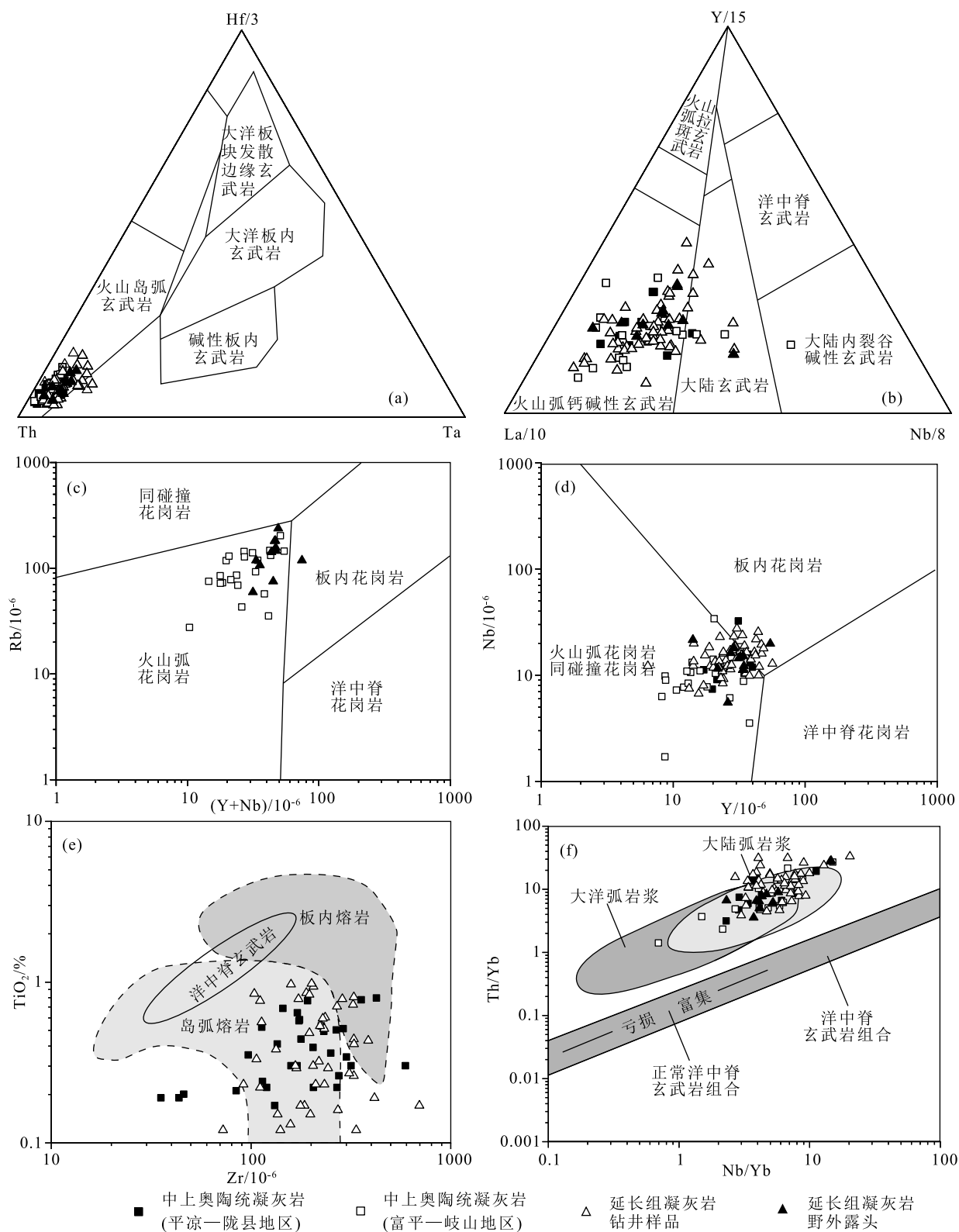


图 7 鄂尔多斯盆地南部两期凝灰岩构造环境判别图解

Fig. 7 Discriminant diagrams of two-stage tuff tectonic environment in the southern Ordos Basin

a—Ta—Hf/3—Th 图解 (底图据 Mullen et al., 1983); b—Nb/8—Y/15—La/10 图解 (底图据 Cabanis et al., 1989); c—(Y+Nb)—Rb 图解 (底图据 Pearce et al., 1984); d—Y—Nb 图解 (底图据 Pearce et al., 1984); e—Zr—TiO₂ 图解 (底图据 Pearce, 1982); f—Nb/Yb—Th/Yb 图解 (底图据 Pearce et al., 1995)

与相邻造山带联系的纽带 (Zhang et al., 2007; Yang et al., 2019), 为进一步探讨鄂尔多斯地区演化及其与周邻造山带关系奠定了良好的基础。

沉积及构造演化研究表明, 中奥陶世末—晚奥陶世, 鄂尔多斯地区在内的华北克拉通发生了明显的沉积-构造转化, 早古生代持续近 1 亿年的滨浅海台地环境趋于结束, 华北克拉通主体开始遭受 1 亿多年的风化剥蚀, 鄂尔多斯西南部中央古隆起大规模隆升 (解国爱等, 2003), 在鄂尔多斯西南边缘上奥陶统开始转变为深水斜坡沉积环境, 发育了奥陶系最主要的烃源岩 (平凉组页岩), 同时广泛出现以碳酸盐岩碎屑流、重力流、硅质岩等为代表的深水环境沉积 (邵东波等, 2019), 同期出现了大量滑塌褶皱变形和滑塌角砾岩 (袁效奇等, 2014), 凝灰岩广泛发育其中, 且平面展布呈现由南向北、由南西向东逐渐减薄的趋势 (图 1)。上述一系列沉积事件表现为较强的空间一致性, 其时限与凝灰岩主要发育期 (449~453 Ma) 一致, 反映存在一个区域性的构造活动期。周邻区域构造研究表明, 北祁连和北秦岭在早古生代经历了相似的洋陆转化过程, 中晚奥陶世商丹洋盆俯冲进入高峰期, 北秦岭地区广泛的岛弧岩浆活动时限一般集中分布在 450~470 Ma (图 7), 华北板块南缘由被动大陆边缘向主动大陆边缘转换, 发育了汇聚板块边缘的沟-弧-盆体系 (王振涛等, 2015b), 二郎坪弧后盆地打开, 鄂尔多斯盆地西南部转变为弧后盆地北部边缘部分 (李文厚等, 1997), 因此, 广布鄂尔多斯西南缘奥陶系的凝灰岩可能代表了主动大陆边缘形成过程中的岛弧喷发事件, 凝灰岩来自盆地南部北秦岭—祁连地区的火山弧喷发可能性最大 (张进等, 2012), 并在鄂尔多斯地区南缘较深水环境中得以保存。表明鄂尔多斯地区中晚奥陶世区域沉积-构造环境的重大转变是对其南侧北秦岭商丹洋盆消减、闭合过程及相邻岛弧火山作用的时空响应。

中晚三叠世, 鄂尔多斯地区进入延长期大型拗陷湖盆发育演化阶段, 并于延长组长 7 期出现了盆地沉积-构造格局的重大转变, 主要表现为长 7 期以来盆地西南部岩石类型、矿物组分及源区大地构造背景发生了明显转变 (王建强等, 2015), 湖盆演化进入鼎盛时期, 盆地沉积-沉降中心向西南迁移近 120 km (刘池洋等, 2020), 盆地西南部强烈拗陷, 陡坡地形开始出现 (廖纪佳等, 2013), 半深湖—深

湖区范围达 $10 \times 10^4 \text{ km}^2$ 以上, 呈北西—南东向展布, 最重要的优质烃源岩 (张家滩页岩) 发育, 为盆地富生烃凹陷主形成期 (刘池洋等, 2020); 此外, 在盆地深湖区发育大量浊流、重力流沉积, 广泛出现砂岩墙、砂岩脉、砂岩揉皱、砂泥质角砾等同沉积变形构造, 具有南强北弱、西南强东北弱的特点 (邱欣卫等, 2013), 而延长组凝灰岩夹层亦在长 7 底部最发育, 同时呈现由南向北逐渐减薄的特征 (图 1), 凝灰岩主发育期年龄 (227~242 Ma) 对上述转变时限具有较好的约束。区域构造研究表明, 随着勉略洋盆的闭合, 中晚三叠世扬子板块向华北板块发生俯冲、拼接, 秦岭造山带于晚三叠世进入全面陆内碰撞、汇聚造山, 碰撞导致地壳增厚, 并发生部分熔融, 形成花岗岩体侵位 (Dong et al., 2016), 这与秦岭造山带印支期花岗岩岩体年龄主体集中于 210~237 Ma 有较好的对应 (图 7), 而在扬子板块向华北板块的俯冲, 勉略洋盆关闭过程中, 可能出现火山喷发作用, 形成火山弧。结合前述鄂尔多斯延长组湖盆沉积-构造格局重大转变时空特点, 认为其应是对盆地南侧秦岭造山带中晚三叠世构造活动的响应, 推测广泛分布于中晚三叠世鄂尔多斯湖盆中的火山物质可能来源于盆地南部或西南部的秦岭造山带, 而该期正是湖盆发育的鼎盛时期 (梁晓伟等, 2020), 稳定的深水环境为凝灰岩的广泛发育和大量保存提供了有利的赋存环境。

需要说明的是, 在盆地南部及邻区造山带至今尚无中—晚奥陶世及晚三叠世火山口的报道, 然而结合 2 期凝灰岩的分布特点、发育的构造背景及秦岭—祁连造山带的活动特征, 推测火山口应分布在北秦岭—祁连一带, 但由于该区后期改造强烈, 地质条件复杂, 同时部分地区受中生代地层覆盖, 相关研究有待进一步深入。

综上所述, 认为该 2 期凝灰岩的发育是对秦岭造山带加里东期商丹洋盆和印支期勉略洋盆俯冲闭合过程在相邻盆地 (鄂尔多斯地区) 的响应和记录, 表明秦岭造山带的构造演化对鄂尔多斯盆地南部早古生代海相盆地转化和中生代大型陆内湖盆发育具有重要的控制作用, 深刻地影响着鄂尔多斯盆地的成因动力机制和沉积-沉降充填过程。上述认识对深入探讨鄂尔多斯盆地南部和秦岭造山带显生宙期间长时间尺度盆山演化提供了一定依据, 具有重要指导意义。

5 结 论

鄂尔多斯盆地凝灰岩夹层主要发育于盆地南部早古生代中—上奥陶统和中生代延长组,分别为古生代海陆转化和中生代大型坳陷湖盆发育演化的关键时期,通过上述 2 期凝灰岩地质特征的综合研究与分析,主要取得以下认识。

(1) 中—上奥陶统和延长组凝灰岩分布均呈现出从盆地南部向北部逐渐变薄、层数逐渐变少的特点,主要保存于晚奥陶世南缘深水斜坡和延长期大型坳陷湖盆的深湖相区域,表明稳定的深水环境为凝灰岩保存提供了有利的条件。

(2) 结合元素地球化学特征,表明 2 期凝灰岩原岩主体以钾质中酸性岩浆为主,其形成与火山弧密切相关;大量年代学分析表明其发育时限分别集中于晚奥陶世桑比—凯迪期(449~453 Ma)和中晚三叠世拉丁—卡尼期(227~242 Ma)。

(3) 综合鄂尔多斯地区晚奥陶世和延长期沉积—构造特征及周邻造山带构造演化,认为晚奥陶世和延长期凝灰岩的发育是对秦岭造山带加里东期商丹洋盆和印支期勉略洋盆俯冲闭合过程在相邻盆地的响应和记录,秦岭造山带构造演化对鄂尔多斯盆地南部早古生代海相盆地转化和中生代大型陆内湖盆发育具有重要的控制作用,深刻的影响着鄂尔多斯盆地成因动力机制和沉积—沉降充填过程。

参考文献

- Astini R A, Collo G, Martina F, et al. Ordovician K-bentonites in the upper-plate active margin of Western Gondwana, (Famatina Ranges): Stratigraphic and palaeogeographic significance[J]. *Gondwana Research*, 2007, 11(3): 311-325.
- Cabanis B. Le diagramme La/10 - Y/15 - Nb/8: unoutil pour la discrimination des series volcaniques et la mise en evidence des processus de melange et/ou de contamination crustale[J]. *Research Gate*, 1989, 309: 2023-2029.
- 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.
- Dong Y P, Santosh M. Tectonic architecture and multiple orogeny of the Qinling Orogenic Belt, Central China[J]. *Gondwana Research*, 2016, 29(1): 1-40.
- Foreman B Z, Rogers R R, Deino A L, et al. Geochemical characterization of bentonite beds in the two Medicine Formation (Campanian, Montana), including a new $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age [J]. *Cretaceous Research*, 2008, 29(3): 373-385.
- Grevenitz P, Carr P, Hutton A, et al. Origin, alteration and geochemical correlation of Late Permian airfall tuffs in coal measures, Sydney Basin, Australia[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2003, 55: 27-46.
- Huff W D. Ordovician K-bentonites: Issues in interpreting and correlating ancient tephra[J]. *Quaternary International*, 2008, 178(1): 276-287.
- Jiang Y H, Liu Z, Jia R Y, et al. Miocene potassic granite-syenite association in western Tibetan Plateau: Implications for shoshonitic and high Ba-Sr granite genesis[J]. *Lithos*, 2012, 134/135(3): 146-162.
- Kramer W, Weatherall G, Offler R, et al. Origin and correlation of tuffs in the Permian Newcastle and Wollombi Coal Measures, NSW, Australia, using chemical finger printing[J]. *International Journal of Coal Geology*, 2001, 47: 115-135.
- Maitre R W L. A proposal by the IUGS Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks for a chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali silica (TAS) diagram[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1984, 31(2): 243-255.
- Mullen E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: a minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1983, 62(1): 53-62.
- Pearce J A, Cann J R. Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1973, 19(2): 290-300.
- Pearce J A. Trace element characteristics of lavas from destructive plate boundaries [C]// *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*. John Wiley and Sons, 1982: 525-548.
- Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G, et al. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks[J]. *Jour. Petrol.*, 1984, (4): 956-983.
- Pearce J A, Peate D W. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic ARC Magmas[J]. *Annual Review Earth & Planetary Science Letter*, 1995, 23(1): 251-285.
- Qiu X W, Liu C Y, Mao G Z, et al. Late Triassic tuff intervals in the Ordos basin, Central China: Their depositional, petrographic, geochemical characteristics and regional implications [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2014, 80: 148-160.
- Su W B, Zhang S, Huff W D, et al. SHRIMP U-Pb ages of K-bentonite beds in the Xiamaling Formation: Implications for revised subdivision of the Meso- to Neoproterozoic history of the North China Craton[J]. *Gondwana Research*, 2008, 14(3): 543-553.
- Sun Y, Li X, Liu Q, et al. In search of the inland Carnian Pluvial Event: Middle-Upper Triassic transition profile and U-Pb isotopic dating in the Yanchang Formation in Ordos Basin, China[J]. *Geological Journal*, 2019, (4): 1-15.
- Sun S S, Mc, Donough 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.
- Winchester J A, Floyd P A. Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements [J]. *Chemical Geology*, 1977, 20: 325-343.

- Xie X. Sedimentary record of Mesozoic intracontinental deformation in the south Ordos Basin, China[D]. Ph.D., Department of Geology and Geophysics, 2007.
- Yang J, Cawood P A, Montañez I P, et al. Enhanced continental weathering and large igneous province induced climate warming at the Permo-Carboniferous transition[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 534: 1-9.
- Yuan W, Liu G D, Xu L M, et al. Petrographic and geochemical characteristics of organic-rich shale and tuff of the Upper Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin, China: implications for lacustrine fertilization by volcanic ash[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2018, 56(1): 47-59.
- Zhang S H, Z Y, Song B, et al. Zircon SHRIMP U-Pb and in-situ Lu-Hf isotope analyses of a tuff from Western Beijing: Evidence for missing Late Paleozoic arc volcano eruptions at the northern margin of the North China block[J]. Gondwana Research, 2007, 12(1/2): 157-165.
- Zhu R K. High-precision Dating and Geological Significance of Chang 7 Tuff Zircon of the Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin in Central China[J]. Acta Geologica Sinica, 2019, 93(6): 1823-1834.
- 陈诚, 史晓颖, 裴云鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南缘晚奥陶世钾质斑脱岩——SHRIMP 测年及其成因环境[J]. 现代地质, 2012, 26(2): 205-219.
- 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, (18): 1901-1908.
- 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 等. 北秦岭西段早古生代埃达克岩地球化学特征及岩石成因[J]. 地质学报, 2008, (4): 475-484.
- 陈朝兵, 陈新晶, 黄锦袖, 等. 造山带隆升与非均衡沉降盆地的响应关系——以鄂尔多斯盆地陇东地区长 7-长 6 油层组为例[J]. 石油实验地质, 2019, 41(5): 674-681, 690.
- 邓胜徽, 卢远征, 罗忠, 等. 鄂尔多斯盆地延长组的划分、时代及中—上三叠统界线[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(10): 1293-1311.
- 邓秀芹, 罗安湘, 张忠义, 等. 秦岭造山带与鄂尔多斯盆地印支期构造事件年代学对比[J]. 沉积学报, 2013, 31(6): 939-953.
- 付玲, 李建忠, 徐旺林, 等. 鄂尔多斯盆地中东部奥陶系盐下深层储层特征及主控因素[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1548-1561.
- 高璞, 高伟, 姚志刚, 等. 鄂尔多斯盆地延长组钾质斑脱岩地球化学特征[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2017, 32(1): 8-13.
- 胡艳华, 刘健, 周明忠, 等. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩研究评述[J]. 地球化学, 2009, 38(4): 393-404.
- 黄栋, 惠倩楠. 华北地块南缘富平奥陶系赵老峪组凝灰岩定年研究[J]. 西部资源, 2016, 74(5): 91-92.
- 计波, 焦养泉, 刘阳, 等. 鄂尔多斯盆地东北部下侏罗统富县组底部石英砂岩成因与物源[J]. 地质通报, 2022, 41(9): 1601-1612.
- 景辅泰, 罗霞, 杨智, 等. 页岩层系致密储层物性下限——以鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段为例[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(6): 835-845.
- 赖小东, 杨晓勇, 高鹏, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组富铀凝灰岩地球化学特征及形成机制[J]. 地质科学, 2010, 45(3): 757-776.
- 李子颖, 刘武生, 李伟涛, 等. 内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J]. 中国地质, 2022, 49(4): 1009-1047.
- 李惠民, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭造山带商南-西峡地区富水杂岩的变辉长岩中斜锆石与锆石 U-Pb 同位素年龄的差异[J]. 地质通报, 2006, 25(6): 653-659.
- 李泯星, 屈海洲, 曾琪, 等. 四川盆地西北部上二叠统吴家坪组火山碎屑岩孔隙演化特征及有利储集区分布[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(11): 1574-1584.
- 李文厚, 梅志超, 陈景维, 等. 陕西渭北奥陶系放射虫硅质岩与火山凝灰岩的成因环境[J]. 地质通报, 1997, (4): 423-427.
- 李文厚, 陈强, 李智超, 等. 鄂尔多斯地区早古生代岩相古地理[J]. 古地理学报, 2012, 14(1): 85-100.
- 李振宏. 鄂尔多斯盆地对秦岭造山过程的构造沉积响应[D]. 中国地质科学院博士学位论文, 2011.
- 李振宏, 徐黎明, 刘新社, 等. 鄂尔多斯盆地南缘奥陶纪沉积充填记录的关键时限及其构造意义[J]. 地质科学, 2015, 50(2): 428-445.
- 梁晓伟, 关轩轩, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地延长组 7 段页岩油储层储集性特征[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(10): 1489-1500.
- 廖纪佳, 朱筱敏, 邓秀芹, 等. 鄂尔多斯盆地陇东地区延长组重力流沉积特征及其模式[J]. 地学前缘, 2013, 20(2): 29-39.
- 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, (5): 617-638.
- 刘池洋, 王建强, 邱欣卫, 等. 鄂尔多斯盆地延长组富烃坳陷形成的动力学环境与构造属性[J]. 岩石学报, 2020, 36(6): 1913-1930.
- 刘军锋, 孙勇, 孙卫东, 等. 秦岭拉鸡庙镁铁质岩体锆石 LA-ICP-MS 年代学研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(2): 320-330.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代: 来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报, 2007, (11): 1550-1561.
- 邱欣卫, 刘池洋, 李元昊, 等. 鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义[J]. 沉积学报, 2009, 27(6): 1138-1146.
- 邱欣卫, 刘池洋, 毛光周, 等. 鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征[J]. 地球科学, 2011, (1): 139-150.
- 邱欣卫, 刘池洋, 王建强, 等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世深湖区同沉积变形构造特征及成因[J]. 地质科学, 2013, 48(1): 204-216.
- 邵东波, 包洪平, 魏柳斌, 等. 鄂尔多斯地区奥陶纪构造古地理演化与沉积充填特征[J]. 古地理学报, 2019, 21(4): 537-556.
- 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约[J]. 科学通报, 2004, (12): 1209-1211.
- 万斌, 关成国, 周传明, 等. 华南埃迪卡拉系底部钾质斑脱岩的岩石地球化学特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(12): 4373-4386.
- 王多云, 辛补社, 杨华, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长 7 底部凝灰岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义[J]. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(10): 2160-2171.
- 王洪亮, 陈亮, 孙勇, 等. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1 Ga 的捕虏锆石[J]. 科学通报, 2007, (14): 1685-1693.
- 王建强, 刘池洋, 郭真, 等. 鄂尔多斯盆地中南部晚三叠世延长组区域构造环境转变的沉积响应[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 194-204.
- 王建强, 刘池洋, 李行, 等. 鄂尔多斯盆地南部延长组长 7 段凝灰岩形成时代、物质来源及其意义[J]. 沉积学报, 2017, 35(4): 691-704.
- 王振涛, 周洪瑞, 王训练, 等. 鄂尔多斯盆地西、南缘奥陶纪地质事件群

- 耦合作用[J].地质学报,2015,89(11):1990-2004.
- 王振涛,周洪瑞,王训练,等.鄂尔多斯盆地西南缘奥陶纪火山活动记录:来自陕甘地区平凉组钾质斑脱岩地球化学和锆石年代学的信息[J].岩石学报,2015,31(9):2633-2654.
- 王振涛,周洪瑞,王训练,等.陕西耀县上奥陶统桃曲坡组下部钾质斑脱岩 U-Pb 年龄的首次报道[J].地质学报,2018,92(2):330-340.
- 吴素娟,李振宏,胡健民,等.鄂尔多斯盆地南缘赵老峪剖面奥陶系凝灰岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年及其地质意义[J].地质论评,2014,60(4):903-912.
- 吴素娟,张永生,邢恩袁,等.鄂尔多斯盆地西北缘奥陶纪凝灰岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素特征及地质意义[J].地质论评,2017,63(5):1309-1327.
- 解国爱,张庆龙,郭令智,等.鄂尔多斯盆地西缘和南缘古生代前陆盆地及中央古隆起成因与油气分布[J].石油学报,2003,(2):18-23,29.
- 许锋,朱增伍,李长春,等.鄂尔多斯盆地东南部延长组长 7 段厚层熔结凝灰岩特征及其地质意义[J].现代地质,2019,33(2):389-400.
- 闫全人,陈隽璐,王宗起,等.北秦岭小王洞枕状熔岩中淡色侵入岩的地球化学特征、SHRIMP 年龄及地质意义[J].中国科学(D 辑),2007,(10):1301-1313.
- 杨甫,陈刚,陈强,等.鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组碎屑岩锆石 U-Pb 年龄及物源分析[J].地质论评,2015,61(1):172-182.
- 杨华,席胜利,魏新善,等.鄂尔多斯多旋回叠合盆地演化与天然气富集[J].中国石油勘探,2006,(1):17-24.
- 杨文龙,李碧乐,王国志,等.沱沱河地区多才玛铅锌矿晶屑熔结凝灰岩锆石 SHRIMP 年龄及岩石地球化学特征[J].西北地质,2016,49(2):59-69.
- 杨钊,董云鹏,柳小明,等.西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MSU-Pb 定年[J].地质通报,2006,(11):85-89.
- 袁卫国.鄂尔多斯盆地南缘中奥陶统火山凝灰岩的研究与意义[J].石油实验地质,1995,(2):167-170.
- 袁效奇,苏德辰,贺静,等.鄂尔多斯南缘中奥陶统中的滑塌构造及其地震成因[J].地质论评,2014,60(3):529-540.
- 袁珍,李文厚,杨喜彦,等.鄂尔多斯盆地三叠系延长组事件沉积及其地质意义[J].西北大学学报(自然科学版),2019,49(3):406-416.
- 张本健,王宇峰,裴森奇,等.川西北地区上二叠统吴家坪组沉积演化[J].天然气地球科学,2019,30(12):1709-1720.
- 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.
- 张辉,彭平安,张文正.鄂尔多斯盆地延长组长 7 段凝灰岩锆石 U-Pb 年龄、Hf 同位素组成特征及其地质意义[J].岩石学报,2014,30(2):575-574.
- 张进,李锦轶,刘建峰,等.早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系:来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J].岩石学报,2012,28(9):2912-2934.
- 张文,李玉宏,张乔,等.鄂尔多斯盆地南部延长组时代划分及长 7³对印支 I 幕的响应[J].地球科学,2017,42(9):1565-1577.
- 张文正,杨华,彭平安,等.晚三叠世火山活动对鄂尔多斯盆地长 7 优质烃源岩发育的影响[J].地球化学,2009,38(6):573-582.
- 张文正,杨华,解丽琴,等.湖底热水活动及其对优质烃源岩发育的影响——以鄂尔多斯盆地长 7 烃源岩为例[J].石油勘探与开发,2010,37(4):424-429.
- 张云,张天福,程先钰,等.鄂尔多斯盆地东北部侏罗纪含铀岩系三维地质结构与铀成矿规律浅析[J].中国地质,2022,49(1):66-80.
- 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.
- 赵向东.二叠纪末大灭绝后鄂尔多斯湖泊生态系统的恢复[D].中国科学技术大学硕士学位论文,2020.
- 赵振宇,郭彦如,王艳,等.鄂尔多斯盆地构造演化及古地理特征研究进展[J].特种油气藏,2012,19(5):15-20,151.