

doi:10.3799/dqkx.2017.111

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

张文^{1,2}, 李玉宏^{2*}, 张乔², 陈高潮², 韩伟², 赵峰华¹

1. 中国矿业大学地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

2. 中国地质调查局西安地质调查中心, 陕西西安 710054

摘要:鄂尔多斯盆地延长组地层时代划分存在较大分歧, 即延长组地层时代是否包含中三叠世以及中、上三叠统界线的确定, 而长 7³ 地层的归属是其关键。针对争议采集了盆地南部何 2 井长 7³ 底部凝灰岩(H2-2)和长 7³ 中上部凝灰岩(H2-1)样品, 对 H2-2 进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩相学研究, 对 H2-1 进行了岩相学和地球化学特征分析。结果表明: 岩浆锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权年龄为 239.8 ± 2.0 Ma, 属于中三叠世拉丁期, 构造活动对应印支 I 幕; 凝灰岩来源于大陆花岗岩环境, 与西秦岭地区的构造环境一致。结合前人研究成果, 认为延长组地层跨中、晚三叠世, 长 7³ 地层属于延长组第 2 段并划归到中三叠统, 其顶部(即“张家滩页岩”顶部)为中、上三叠统的分界。印支 I 幕构造岩浆活动在盆地发育了延长组长 7 油层组及凝灰岩等事件沉积, 西秦岭地区的花岗岩岩浆活动与长 7³ 凝灰岩在年龄、分布厚度、岩石组成和构造环境上均具耦合性, 长 7³ 凝灰岩有可能来自西秦岭的岩浆活动。

关键词:鄂尔多斯盆地; 延长组; 长 7³; 凝灰岩; 时代划分; 印支 I 幕; 地球化学。

中图分类号: P539; P542

文章编号: 1000-2383(2017)09-1565-13

收稿日期: 2016-12-11

Chronostratigraphic Division of Yanchang Formation in Southern Ordos Basin and Response of Chang 7³ to Episode I of Indosinian Movement

Zhang Wen^{1,2}, Li Yuhong^{2*}, Zhang Qiao², Chen Gaochao², Han Wei², Zhao Fenghua¹

1. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China

2. Xi'an Geological Survey Center, China Geological Survey, Xi'an 710054, China

Abstract: The main controversies of Triassic Yanchang Formation in Ordos basin are focused on the following two aspects: whether the age of Yanchang Formation covers the Middle Triassic; the confirmation of stratigraphic boundary between Middle and Upper Triassic, especially the attribution of the Chang 7³. Therefore, the tuff samples of H2-2 and H2-1 were taken from the bottom and upper-middle Chang 7³ in H2 Well respectively. The chronological (zircon LA-ICP-MS U-Pb) and petrographical features of H2-2 and the petrographical and geochemical features of H2-1 are researched. The results indicate that the zircons in H2-2 belong to magmatic zircons and their weighted average $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages are 239.8 ± 2.0 Ma, which is classified into Middle Triassic Ladinian age and corresponds to Episode I of Indosinian Movement. The tuff of Chang 7³ is derived from continental granite, in accordance with the tectonic setting of West Qinling region. Combined with previous results, it is thought that Yanchang Formation spans the Middle and Late Triassic epochs. Chang 7³ belongs the 2nd member of Yanchang Formation and its top surface (i.e. top surface of Zhangjiatan shale) is the boundary between Middle and Upper Triassic. The magma activities in Episode I of Indosinian Movement brought about the Chang 7 oil group, the tuff and other event sediments in Ordos basin. And the granitic magma activities in West Qinling region are coupled with the tuff of Chang 7³ in distribution thickness,

基金项目:国家自然科学基金(No.41202104);中国地质调查局矿产资源调查评价项目(Nos.121201011000150014, 12120113040300)。

作者简介:张文(1994—),女,在读博士,主要从事同位素地球化学及非常规油气地球化学研究,ORCID:0000-0003-0156-2358。

E-mail: wenzhangcn@outlook.com

* 通讯作者:李玉宏,ORCID:0000-0001-7397-519X,E-mail: L1763@tom.com

引用格式:张文,李玉宏,张乔,等,2017.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.地球科学,42(9):1565—1577.

ages, magma features, and tectonic environment. It is likely that the tuff of Chang 7³ derives from the magma activities in West Qinling region.

Key words: Ordos basin; Yanchang Formation; Chang 7³; tuff; chronostratigraphic division; episode I of indosinian movement; geochemistry.

0 引言

凝灰岩是一种火山喷发的物质表现,具等时性和广泛性,常作为标志层进行地层划分和对比(Desmares *et al.*, 2007; 李振宏等,2014),也是岩浆活动和构造运动的响应(杨江海,2012; 王富明等,2014)。近年来,锆石 U-Pb 定年技术逐渐应用到凝灰岩中,其精确的地质年龄有重要的地层和构造意义(黄虎等,2012; 覃永军等,2015)。

鄂尔多斯盆地延长组不仅是一套重要的含油气层系,而且是北方陆相三叠系地层的层型剖面。但长期以来,延长组的地层时代划分存在较大分歧:一种观点认为延长组地层属于晚三叠世沉积建造(谢秋元等,1974,陕甘宁盆地石油地质普查总结报告(内部报告);杨俊杰,2002),另一种观点认为延长组跨越中、晚三叠世(中国地质科学院地质研究所,1980; 陕西省地质矿产局,1989; 邓秀芹等,2009; Wang *et al.*, 2014)。在后一种观点中,关于中、上三叠统地层的分界也有不同的声音,主要集中于长 7³(长 7 黑色油页岩到底部凝灰岩)的归属(图 1)。另外,虽然 Fromaget(1934)提出印支运动,但其划归方案仍未统一。广义上,万天丰(2004)认为可以把晚二叠世到三叠纪末期的构造事件统称为印支构造事件,将二叠纪和三叠纪之间的生物集群性灭绝事件囊括在

内。狭义上,划分方案包括两分法(王鸿祯,1981; 汪新文,1996; 陈安清等,2011; 全国地层委员会,2012)和三分法(王双明,1996; 邓秀芹等,2013)。文中采用应用较广的两分法,其印支 I、II 幕大体上对应三分法中印支 II、III 幕。本次研究对鄂尔多斯盆地南部何 2 井中长 7³ 底部凝灰岩进行了锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和岩相学特征研究,对鄂尔多斯盆地三叠系延长组地层进行了厘定,明确了延长组和长 7³ 地层的时代归属。在此基础上,分析了何 2 井中长 7³ 中上部凝灰岩(距底部凝灰岩 16.2 m)的岩相学和地化特征,进一步对印支 I 幕西秦岭造山带和鄂尔多斯盆地的盆—山耦合关系进行探讨。

1 延长组地层划分

延长组为一套河流、三角洲及湖泊相沉积建造,湖泊全盛期(长 7 期)范围可达 105 km² 以上(杨俊杰,2002)。最初,Fuller and Clapp(1926)将延长地区灰色或灰绿色的砂岩和页岩命名为陕西带之延长系;潘钟祥(1936)对陕北植物大化石的组合特征进行研究时将延长层划归为晚三叠世;王尚文(1950,陕西延长附近石油地质初步调查报告)在延长层上覆瓦窑堡煤系中发现一侵蚀面,将侵蚀面之下的地层划入“延长系”,即瓦窑堡组(T_3y^5);陕西省地质

潘钟祥 (1936)		谢秋元等 (1974)		中国地质科学 院地质研究 所(1980)	陕西省地质矿 产局(1989)	马润华 (1998)	杨俊杰 (2002)			邓秀琴(2009) Wang <i>et al.</i> (2014)		本文		
侏罗系	瓦窑堡 煤系	上三叠统延 长组	T_3y^5	上 三 叠 统	延 长 组	瓦窑堡组	上 三 叠 统	瓦窑堡组	上三 叠 统 延 长 组	T_3y^5	长 1	上 三 叠 统	长 1	
上 三 叠 统	延 长 层		T_3y^4			永坪组		永坪组		T_3y^4	长 2		长 2	
			T_3y^3			胡家村组		胡家村组		T_3y^3	长 3		长 3	
			T_3y^2	中 三 叠 统	铜川组	铜川组	中 三 叠 统	铜川组		T_3y^2	长 4+5		长 4+5	
			T_3y^1			中 三 叠 统		中 三 叠 统		T_3y^1	长 6		长 6	
											长 7		长 7	
										T_3y^2	长 8	中 三 叠 统	长 7 ¹⁺²	
										T_3y^2	长 9		长 7 ³	
										T_3y^1	长 10		长 8	
											长 10	T ₂ -y ¹	长 9	
													长 10	

① 谢秋元, 孙国凡, 李云龙等, 1974. 陕甘宁盆地石油地质普查总结报告(内部报告).

图 1 鄂尔多斯盆地延长组地层划分对比

Fig.1 Comparison of stratigraphic division of Yanchang Formation in Ordos basin

局第三石油普查队(谢秋元等,1974,陕甘宁盆地石油地质普查总结报告(内部报告))将瓦窑堡组和延长层统称为延长组,进一步自下而上划分为5段,对应后来的砂岩段(T_3y^1)、油页岩段(T_3y^2)、含油砂页岩段(T_3y^{3-4})、含煤岩段(T_3y^5),划归到上三叠统;中国地质科学院地质研究所(1980)发现延长组中 $T_3y^1-T_3y^2$ 的植物化石与下伏中三叠统纸坊组一致,故将 $T_3y^1-T_3y^2$ 划归为中三叠统,命名为铜川组。在此基础上,陕西省区域地层表编写组认为延长组厚度大,岩性复杂,将其自下而上命名为胡家村组、永坪组和瓦窑堡组,对应第3段到第5段(陕西省地质矿产局,1989);陕西省岩石地层编写组将含煤层段(T_3y^5)单独划分出来,命名为瓦窑堡组,而将 $T_{2-3}y^{1-4}$ 命名为延长组(马润华,1998)。此后,长庆油田(杨俊杰,2002)等油田部门在五分方案的基础上,按照岩性、电性及含油性等特征再将其自上而下细分为10个油层组(图1),划归到上三叠统。近年来

部分学者通过孢粉组合、事件沉积、锆石U-Pb定年等方面的研究,将长1—长7油层组限定到上三叠统,而将长8—长10划归到中三叠统(邓秀芹等,2009;陈安清等,2011;Wang et al.,2014)。

值得注意的是,中、上三叠统界线在上述划分方案并不一致,地矿部门认为的第2段和第3段的分界与石油部门认为的长7和长8的分界并不完全对应(图1),分歧聚焦于长^{7³}(长7段下部黑色油页岩以下)的归属。因此,在延长组地层划分中存在两大争议:(1)延长组地层时代是否包含中三叠世;(2)中、上三叠统的界线,长^{7³}地层的归属是其关键。延长组的地层亟需用更为精准的锆石年龄进行厘定。

2 凝灰岩特征

鄂尔多斯盆地三叠系延长组长1—长9均发育有凝灰岩,但横向可对比的凝灰岩主要有4套:长

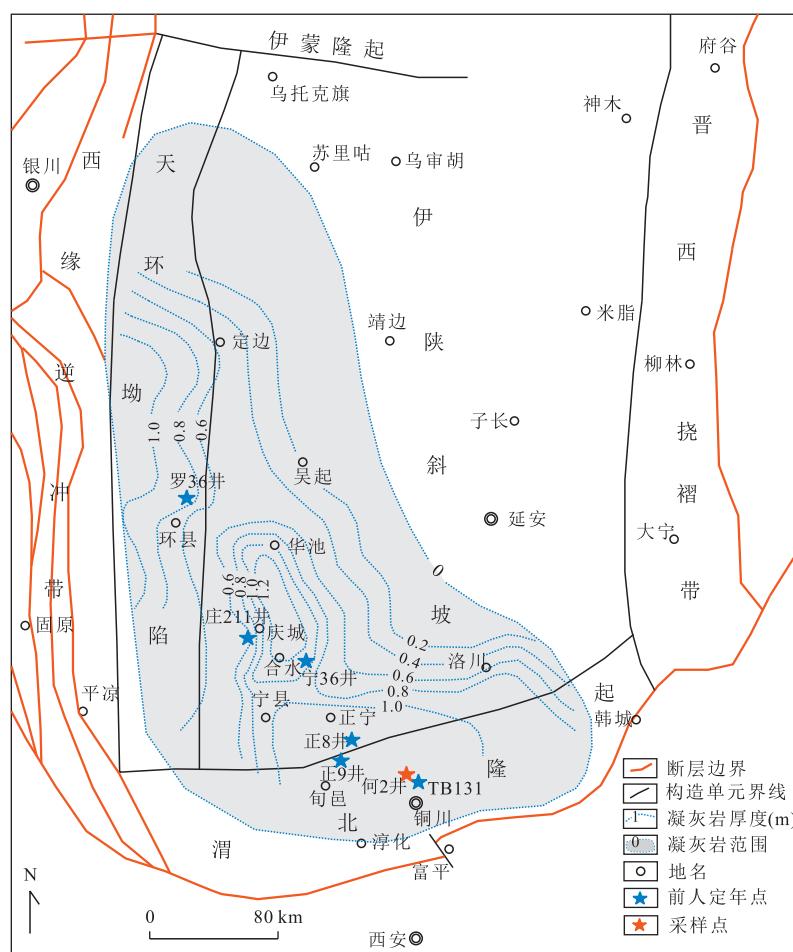


图2 鄂尔多斯盆地长^{7³}底部凝灰岩厚度及采样点

Fig.2 Tuff thickness at the bottom of Chang 7³ and sample location

凝灰岩厚度据邓秀芹等(2008,2013);锆石定年点据Xie(2007)、Wang et al.(2014)、张辉等(2014)

^{9¹}、长 ^{7³} 底、长 ^{7²} 和长 ^{7¹}。其中,以盆地西南部长 ^{7³} 底部凝灰岩最发育(邱欣卫等,2009),厚度由西部、西南部向东北部逐渐减薄(图 2)(邓秀芹等,2008,2009)。张文正等(2009)对盆地南部正 8 井中长 7 烃源岩中的凝灰岩进行统计,结果可见毫米至厘米级纹层 180 余层。延长组凝灰岩中 SiO₂ 含量为 50.29%~79.82%,富钾,Nb/Y-Zr/TiO₂ 图解中数据点落在安山岩一流纹岩之间,火山物质来源于中酸性岩,形成机制包括空降型和水携型两种(邱欣卫等,2011)。

3 采样及分析方法

本文样品采自何 2 井($108^{\circ}58'46''E$, $35^{\circ}16'02''N$),位于铜川市印台区金锁关镇何家坊地区,属鄂尔多斯盆地南部的渭北隆起。样品岩性为黄灰色凝灰岩,采样层位为长 ^{7³} 中上部和底部,分别编号为 H2-1 和 H2-2。

凝灰岩采样难、数量少,本文对样品进行选择性测试(表 1)。利用激光剥蚀等离子质谱仪(LA-ICP-MS)对 H2-2 样品进行锆石 U-Pb 年代学特征分析;利用扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)对 H2-1 和 H2-2 进行岩相学特征分析,并磨制了 H2-1 薄片;利用电感耦合等离子质谱(ICP-MS)对 H2-1 进行地球化学特征分析。其中扫描电镜、X 射线衍射在西安地质矿产研究所实验测试中心完成,其操作流程和测试方法成熟(杜谷等,2014),不再详述。

锆石 U-Pb 定年的流程如下:

(1)挑选锆石。将样品破碎至 100 目左右,经淘洗和分选后,在双目显微镜下手工挑选出待测锆石;(2)制靶、拍照。将挑选好的锆石浇筑在环氧树脂靶上,待固化后将样品靶打磨至锆石核部,然后进行抛光,并对锆石进行透射、反射光显微照片及阴极发光图像分析。前两步在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成;(3)锆石 U-Pb 定年。采用由德国 Coherent 公司生产的 Geolas Pro 型 ArF 准分子激光剥蚀系统(LA)和美国 Agilent 公司生产的 7700x

型四级杆等离子质谱仪(ICP-MS)联合构成的激光剥蚀等离子体质谱分析系统(LA-ICP-MS),样品处理流程见文献(李艳广等,2015),该步骤在西安地质矿产研究所实验测试中心完成。首先对锆石阴极发光图像进行观察,分析锆石表面和内部结构特征(Corfu *et al.*, 2003),选取岩浆锆石环带发育良好的位置进行打点,激光束斑直径 $24 \mu\text{m}$ 。选用两种标准锆石 91500 和 GJ-1 作为标样。元素含量采用美国国家标准技术研究院研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质 NIST-SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标。实验中先进行 NIST610、91500 和 GJ-1 标样测试,然后每完成 5 个样品点,加测 GJ-1 标样一次,每完成 10 个样品点,加测 91500 和 NIST610 标样一次。数据处理采用 Glitter 4.0 和 Isoplot 3.0. 单点测试的绝对年龄误差为 1σ , ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄加权平均值得置信度为 95%。

4 年代学特征

4.1 锆石 CL 图像

本次研究共从 H2-2 样品中挑选出 110 颗锆石样品,阴极发光(CL)图像(图 3)显示晶型为半自型—自型,少数锆石表面有裂纹,部分锆石为完整锆石的一部分,表明沉积前火山灰飘移距离较长。但大部分锆石具有典型的震荡环带和扇形分带结构,仍显示出岩浆锆石的特征。锆石环带较窄,代表微量元素扩散速度慢,结晶时温度较低(吴元保和郑永飞,2004)。部分样品为扇形分带,表明锆石结晶时外部环境的变化导致各晶面生长速度不一致(Vavra *et al.*, 1996)。少数样品的分带不明显,可能受到后期蚀变作用的影响,在选点时已规避(不在图 3 中显示)。

4.2 Th/U 值

大量研究表明,岩浆锆石中 Th/U 比值较大(>0.4),而变质锆石中 Th/U 比值较小(<0.1) (Rubatto and Gebauer, 2000)。变质过程中,较稳定的 U⁴⁺ 比 Th⁴⁺ 更容易保留在锆石晶格中,造成变质锆石较低的 Th/U 值(Pidgeon *et al.*, 1998)。H2-2

表 1 H2-1 和 H2-2 的分析测试项目

Table 1 Test projects of H2-1 and H2-2

样品编号	采样层位	年代学特征		岩相学特征		地球化学特征	
		锆石 U-Pb 定年(LA-ICP-MS)	薄片	扫描电镜(SEM)	X 射线衍射(XRD)	电感耦合等离子质谱(ICP-MS)	
H2-1	长 ^{7³} 中上部		√	√		√	√
H2-2	长 ^{7³} 底部	√		√		√	

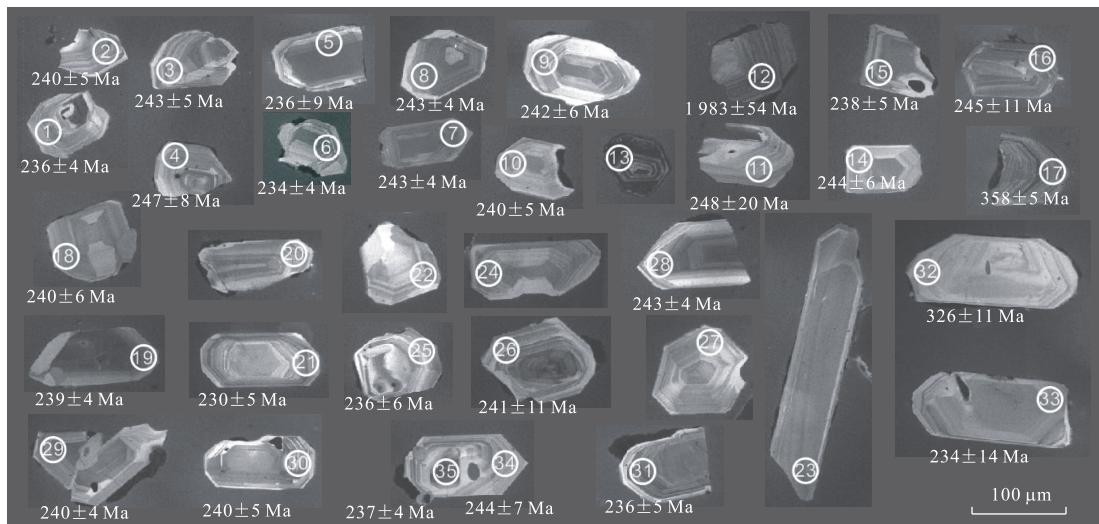


图3 凝灰岩锆石阴极发光照片及年龄(H2-2)

Fig.3 CL images and ages of zircons from tuff (H2-2)

未标注年龄代表该点数据不可用;12号测点用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄(Black *et al.*, 2003),其余为²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄

表2 凝灰岩中锆石U-Pb年龄数据(H2-2)

Table 2 U-Pb isotopic data for obtained from tuff (H2-2)

测点号	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb(Ma)	1σ(Ma)	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U(Ma)	1σ(Ma)	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th(Ma)	1σ(Ma)	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U(Ma)	1σ(Ma)
1	0.70	258	44	238	7	257	10	236	4
2	0.82	257	62	241	10	235	13	240	5
3	0.80	237	63	242	9	253	12	243	5
4	0.89	494	658	273	83	244	23	247	8
5	0.64	251	117	237	17	223	27	236	9
6	0.77	236	42	234	7	226	9	234	4
7	0.75	251	48	243	8	247	11	243	4
8	0.75	237	48	242	7	259	10	243	4
9	0.88	263	80	244	12	249	16	242	6
10	0.75	248	52	240	8	234	11	240	5
11	0.52	233	273	246	42	184	64	248	20
12	0.62	1983	54	1967	23	1948	26	1951	24
14	0.64	240	86	243	12	217	20	244	6
15	0.60	290	54	243	9	209	13	238	5
16	0.53	232	239	243	31	357	57	245	11
18	0.96	249	68	240	10	217	13	240	6
19	0.50	237	37	239	6	261	11	239	4
21	0.73	251	73	240	10	271	15	239	5
22	0.76	264	84	242	13	223	16	240	6
25	0.63	260	79	238	12	281	19	236	6
26	0.62	246	154	241	23	340	39	241	11
28	0.57	282	39	247	7	245	11	243	4
29	0.95	256	46	241	7	248	9	240	4
30	1.49	243	66	240	10	218	9	240	5
31	0.51	239	55	236	8	225	14	236	5
32	0.72	358	101	330	20	325	34	326	11
33	0.48	284	184	239	28	225	47	234	14
34	0.73	266	85	246	13	284	20	244	7
35	0.52	273	36	240	6	225	10	237	4

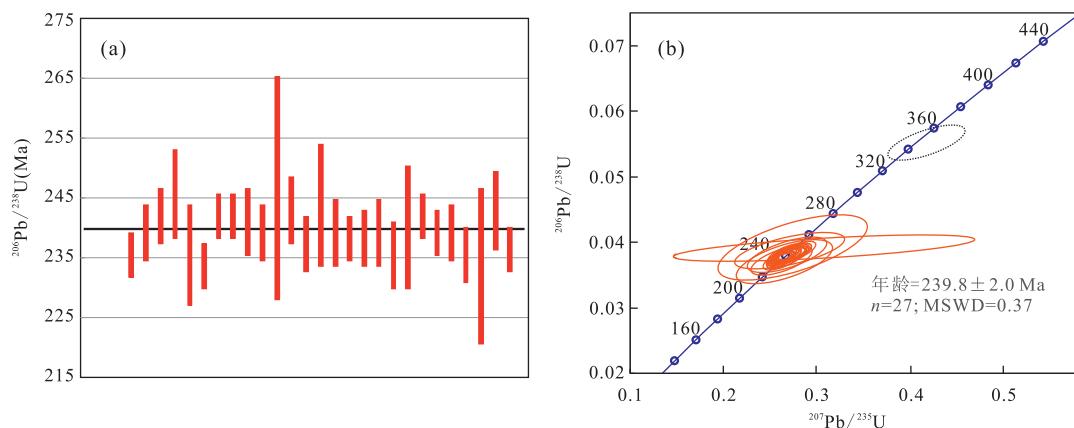


图 4 锆石 U-Pb 年龄(a)及谐和图(b)

Fig.4 Zircon ages (a) and U-Pb concordia diagram (b)

样品中 Th/U 值为 0.48~1.49, 平均值为 0.72, 属于岩浆锆石。

4.3 锆石 U-Pb 年龄

本次研究共测定 35 个锆石点的 U-Pb 年龄, 将 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 偏差大的年龄点剔除后剩 29 个点可用(表 2). 结果表明: 何 2 井长 7 底部凝灰岩有 27 个点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 234~248 Ma, 加权平均年龄为 239.8±2.0 Ma ($n=27$, MSWD=0.37, 图 4), 属于中三叠世拉丁期; 另外 2 个点的年龄分别为 326 Ma ($^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄) 和 1983 Ma ($^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄), 分别属于海西期和吕梁期。值得说明的是, 由于古老锆石(>1000 Ma)易发生铅丢失, 一般采用更为可靠的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(Black *et al.*, 2003)。长 7³ 段的沉积相为半深湖~深湖相, 有东北和西南两大物源(李玉宏, 2014)。海西期在盆地南部的太白县一带有闪长岩出露(宝鸡市地方志编纂委员会, 1998), 吕梁期火山岩在东北物源区的山西五台山、吕梁山、中条山及太行山区也有广泛分布。因此, 这两颗锆石应为源区继承性锆石。

5 岩相学特征

岩石薄片(H2-1)镜下显示, 长 7 段凝灰岩主要为隐晶质凝灰岩(图 5), 具霏细结构, 为脱玻化的长英矿物集合体。单偏光下突起明显(图 5a), 干涉色为彩色色调(图 5b), 说明各个小晶体的晶轴方向不同。镜下可见极少量脱玻化形成的大颗粒石英和长石, 直径 20~50 μm 。同时可见棕色粘土矿物。

X 射线衍射(表 3)表明 H2-1 中以石英和长石为主(64.3%), 粘土矿物主要为伊利石 1Md(28.0%), 绿泥石少量(1%), 同时含部分铁白云石(4.9%)和少量黄铁矿(1.8%)。H2-2 中伊利石 1Md 含量高达 59.0%, 而未检测出长石, 推测是由于长石的伊利石化严重。石英含量为 34.2%, 碳酸盐矿物为菱铁矿(4.0%), 同时含有少量黄铁矿(0.8%)和绿泥石(2.0%)。低温($<120\sim140$ °C)条件下, 钾长石和蒙皂石可发生自发的伊利石化。高温($>120\sim140$ °C)条件下, 高岭石亦可发生伊利石化(黄思静等, 2009), 推测凝灰岩中大量的伊利石是由长石、蒙皂石、高岭石蚀变形成。

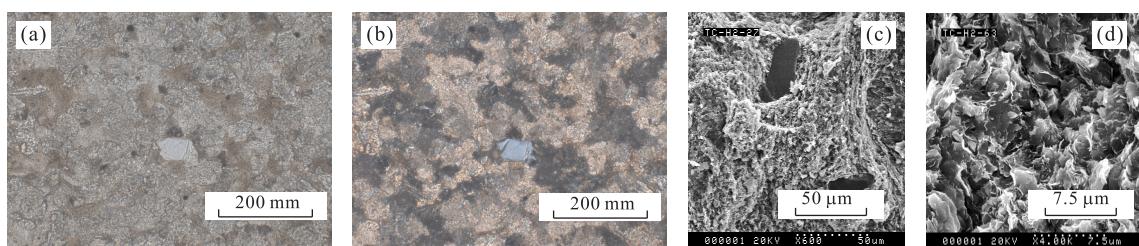


图 5 凝灰岩镜下特征

Fig.5 Microphotographs of tuff

a. H2-1 薄片单偏光; b. H2-1 薄片正交偏光; c. H2-1 扫描电镜; d. H2-2 扫描电镜

表3 X射线衍射结果(%)

Table 3 Results of X-ray diffraction (%)

样品编号	石英	斜长石	铁白云石	菱铁矿	黄铁矿	伊利石 1Md	绿泥石
H2-1	31.4	32.9	4.9	—	1.8	28.0	1.0
H2-2	34.2	—	—	4.0	0.8	59.0	2.0

结合X射线衍射结果,扫描电镜下H2-1样品可见大量鳞片状伊利石,表面光滑的石英或长石颗粒(直径约20 μm)(图5c).H2-2样品风化严重,可见大量鳞片状伊利石(图5d).

6 地球化学特征

何2井延长组长7³中上部(H2-1)的稀土和微量元素的测试结果见表4.用Sun and McDonough(1989)推荐的球粒陨石和原始地幔值对测试结果进行标准化(图6).

凝灰岩中稀土含量较低, $\Sigma \text{REE} = 113.61 \times 10^{-6}$,低于延长组火山灰的平均值 240.16×10^{-6} (邱欣卫等,2011);轻重稀土元素分馏中等,LREE/HREE=5.20,(La/Yb)_n=5.08,轻稀土分异明显,(La/Sr)_n=4.67,重稀土基本未分异,(Gd/Yb)_n=0.97;Eu异常较弱, $\delta \text{Eu}=0.58$;Ce异常较弱, $\delta \text{Ce}=0.84$,指示岩浆演化过程中发生斜长石的结晶分异.稀土元素分配图(图6a)呈负Eu异常的右倾型曲线特征.

原始地幔标准化蛛网图(图6b)显示,Ba、Nb、Sr、Eu相对亏损,指示岩浆发生了高温钾矿物、含铌金属矿物和斜长石的结晶分异.这是由于Ba、Sr与K的性质类似,易在演化过程中以类质同象富集在高温钾长石中(赵振华,1997).Th、U、Pb、Zr、Hf、Li相对富集,Pb的富集程度最高,为原始地幔值的931倍,应该是火山灰中锆石及含锂矿物含量高所致.

由于凝灰岩在形成过程易发生水解蚀变,且后期有伊利石化等蚀变作用,活泼元素对环境的指示意义不明确.而Th/Yb-Nb/Yb图解能消除风化蚀

变过程对元素的影响,具较高的可信度(胡艳华等,2009).本文选用Th/Yb-Nb/Yb图和Nb-Y图(Pearce et al.,1984)来判断凝灰岩的形成环境.在此基础上,统计分析前人对延长组凝灰岩的地球化学的研究(张文正等,2009;邱欣卫等,2011)(图6c,6d).Th/Yb-Nb/Yb图显示凝灰岩的形成环境偏大陆弧岩浆,而Nb-Y判别图指示环境为火山弧花岗岩、同碰撞花岗岩或板内花岗岩,综合判断为大陆花岗岩环境.

7 讨论

7.1 延长组地层时代厘定

本次定年结果表明,何2井长7底部凝灰岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄大部分落在234~248 Ma,加权平均年龄为 239.8 ± 2.0 Ma($n=27$,MSWD=0.37).前人研究结果表明鄂尔多斯盆地铜川金锁关(TB131)、罗36井和庄211井长7底凝灰岩的锆石U-Pb年龄为239.7~241.3 Ma(表5),印证了本次实验数据的可靠性.根据国际地层年代表(Cohen et al.,2013),中上三叠统的分界为237 Ma,故本次定年结果 239.8 ± 2.0 Ma,属于中三叠世拉丁期,对应鄂尔多斯地层分区的铜川组(汪啸风和陈孝红,2005).张辉等(2014)对长7段凝灰岩的U-Pb定年结果中出现晚三叠世年龄(表5),说明长7段地层跨中晚三叠世,即中、上三叠统的分界应位于长7段内部.

在铜川漆水河向北至“三延”和窟野河地区,长7段下部发育有一段区域可对比的地层,岩性依次为油页岩带、黑色页岩(张家滩页岩)和黑色页岩

表4 H2-1微量元素和稀土元素含量(10^{-6})Table 4 Concentration of trace elements and REE (H2-1, 10^{-6})

元素	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb	Sr	Y
含量	20.2	9.52	4.80	27.3	7.02	2.47	17.9	7.54	69.1	37.5	1.25	70.2	156	30.1
元素	Zr	Nb	Mo	Cd	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb
含量	349	16.3	2.47	0.23	5.68	231	25.2	42.2	5.53	18.2	3.48	0.71	4.02	0.73
元素	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	W	Pb	Th	U		
含量	4.78	1.06	3.16	0.51	3.56	0.51	10.3	2.61	1.30	66.1	24.7	6.33		

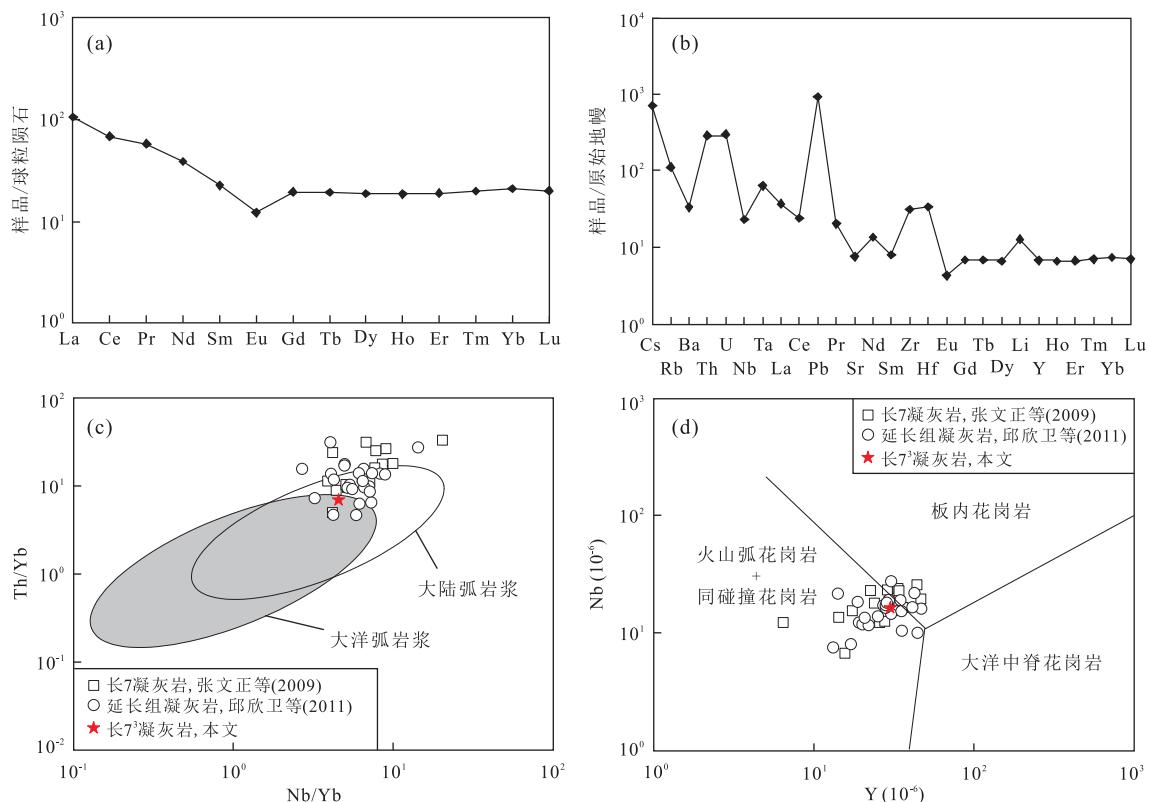


图 6 H2-1 REE 分布模式(a)、蜘蛛网图(b)、Th/Yb-Nb/Yb 图(c)和 Nb-Y 图(d)

Fig.6 Chondrite-nominal REE patterns (a), primitive mantle-normalized trace element pattern (b), Th/Yb-Nb/Yb (c), and Y vs. Nb diagrams (d) of H2-1

a 和 b 图中球粒陨石和原始地幔数据采用 Sun and McDonough(1989) 的推荐值; c 底图据 Pearce and Peate(1995); d 底图据 Pearce *et al.*(1984)

表 5 鄂尔多斯盆地长 7 凝灰岩锆石定年数据

Table 5 Ages of tuff in Chang 7 Formation in Ordos basin

采样位置	采样层位	U-Pb 锆石年龄(Ma)	数据来源
何 2 井	长 7 底凝灰岩	239.8 ± 2.0	本文
罗 36 井	长 7 底凝灰岩	241.3 ± 2.4	Wang <i>et al.</i> , 2014
庄 211 井	长 7 底凝灰岩	239.7 ± 1.7	Wang <i>et al.</i> , 2014
铜川金锁关(TB131)	长 7 底凝灰岩	240.7 ± 0.8	Xie, 2007
宁 36 井	长 7 段	236.1 ± 2.7	张辉等, 2014
正 8 井	长 7 段	234.3 ± 2.8	张辉等, 2014
正 9 井	长 7 段	234.9 ± 2.6	张辉等, 2014

薄层, 即长 7³ 段, 对应延长组第 2 段的顶部(中国地质科学院地质研究所, 1980). 该岩性特征明显, 且在电测曲线上表现为高伽马、中一高电阻、高箱状声速时差(范琳沛, 2014), 是重要的标志层. 刘宪亭(1962)就发现张家滩延长组的黑色页岩中存在杨氏弓鲛鱼化石, 并认为其地质时代应早于晚三叠世. 1980 年, 中国地质科学院地质研究发现延长组第 1 段、第 2 段的孢粉化石与中三叠世二马营组的孢粉化石相似, 瓣鳃类化石黄柏沟珠蚌(*Unio huangbo-gouensis*)与东非坦桑尼亚中三叠世的卡鲁珠蚌

(*Unio karrooensis*)极为相似, 且存在早中三叠世的典型分子—古老石松类肋木属的 *Pleuromeia* 和种子蕨纲的 *Glossopteris*, 认为延长组第 1 段、第 2 段属于中三叠统地层. 也就是说中、上三叠统的分界应位于延长组第 2 段的顶部, 即长 7³ 的顶部.

H2-1 样品的微量元素地球化学特征表明, 长 7 下部的稀土元素分配模式为负 Eu 异常较弱($\delta\text{Eu} = 0.58$)的右倾型曲线. 张文正(2009)认为, 稀土元素标准化分布特征在长 7 段的上部和下部出现分异: 上部表现为 Eu 负异常明显的右倾型, 轻重稀土元

素强烈分异;下部表现为Eu负异常较弱,轻重稀土元素分异中等,说明长7段的下部和上部沉积时沉积环境发生较大变化。此外,张家滩页岩及其对应的油页岩带沉积时(长7³期)鄂尔多斯湖盆面积最大(李玉宏,2014),之后湖盆面积一直缩小,经历了回返抬升和萎缩消亡的过程(王峰等,2010)。长7³沉积期为最大湖泛面,可作为沉积体系的转折点。

因此,将长7³顶部(即延长组第2段和第3段的分界)作为中上三叠统的分界是合理的。鉴于人们的使用习惯和石油生产的便利,本文建议仍沿用之前的名称,将10个油层段全部划归到延长组。由于延长组地层属于中晚三叠世,将原来的代号T_{3y}改为T_{2-3y}(图1)。

7.2 长7³对印支I幕的响应

中三叠世末(印支I幕),扬子板块与华北板块最终自西向东碰撞(Zhang et al.,1996)。该时期是秦岭碰撞造山带和鄂尔多斯盆地形成的重要阶段,表现出紧密的盆—山耦合关系。印支I幕使盆地拗陷幅度急剧增大,湖盆发展进入鼎盛时期,发育有深湖一半深湖黑色页岩和油页岩。同时,由于受到南部应力的挤压作用和火山活动的影响,湖盆东北翼宽缓、西南翼陡倾,西缘、西南缘地区发育冲积扇、扇三角洲沉积体系,沉积中心向西南方向迁至华池—正宁一带,碎屑岩成分成熟度增高(邓秀芹等,2008)。

此外,印支I幕使盆地发育有一系列的事件沉积(陈安清等,2011):长7下部烃源岩(“张家滩页岩”)具高还原硫特征(杨华和张文正,2005),岩心可见黄铁矿和菱铁矿,长7³凝灰岩中也检测出0.8%和1.8%的黄铁矿(本文),说明沉积环境还原缺氧,可能是突发性地火山事件导致生物大量死亡、迅速埋藏所致;震积岩和浊积岩规模较大,强震区临近盆地南部的秦岭造山带,可能与来自南面的应力作用有关,浊积岩可因地震等触发因素形成;长7³广泛发育的凝灰岩是火山活动的直接证据。

以长7³凝灰岩为重点进行分析,结果表明,在印支I幕时期,长7³凝灰岩在年龄、分布厚度、岩石组成和构造环境等方面均与西秦岭花岗质岩浆活动具耦合性:

(1)长7³底部凝灰岩形成年龄为239.8±2.0 Ma,长7凝灰岩中SiO₂含量较高(>53%),指示其来源为中、酸性岩浆(张文正,2009)。中三叠世(250~235 Ma)秦岭花岗质岩浆活动恰好出露在西秦岭西部,花岗岩类型为I型(Wang et al.,2015),如夏河和治力关的埃达克质花岗岩(238±4 Ma,

245±6 Ma)(金维浚等,2005)、谢坑铜金矿区的辉长闪长岩和角闪安山岩(243.8±1.0 Ma,242.1±1.2 Ma)(郭现轻等,2011)、合作地区的美武岩体(245~242 Ma)(骆必继等,2012)。

(2)长7³底部发育区域性可对比的凝灰岩层段(图2),从西南到东北方向,厚度减薄,指示火山口可能在盆地西南部的秦祁造山带(邓秀芹等,2008;邱欣卫等,2009;Wang et al.,2014)。

(3)长7³中上部凝灰岩中石英含量较高(>30%),含有部分铁白云石(4.9%),底部凝灰岩含部分菱铁矿(4%)。盆地西部和西南部物源区的老山地质体有早古生代海相碳酸盐岩地层的参与(邓秀芹等,2009),冲积扇、扇三角洲沉积体系发育,碎屑岩成分成熟度高,与长7³凝灰岩的岩相特征吻合,指示长7³凝灰岩的物源区在盆地西部或西南部。

(4)长7³中上部凝灰岩地化指标指示其来源于大陆花岗岩环境(图5c,5d)。西秦岭造山带在中三叠中期前经历了板内伸张阶段,发育有大陆板内的陆表海沉积,中三叠晚期至晚三叠世(印支期)正好发育陆内叠覆造山作用,发生了壳内拆离、逆冲逆掩造山和构造花岗岩岩浆事件(冯益民等,2003),即二者在构造环境上具耦合性。

鄂尔多斯盆地延长组长7油层组对印支I幕具有指示作用,西秦岭地区的花岗质岩浆活动与长7³凝灰岩具有多方面的耦合关系,可以推测,长7³凝灰岩可能来自西秦岭的岩浆活动。

8 结论

(1)本文分析了鄂尔多斯盆地南部渭北隆起何2井延长组长7下部和底部凝灰岩的年代学、岩相学、地球化学特征,即:①长7底部凝灰岩的²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄主要为234~248 Ma,加权平均年龄为239.8±2.0 Ma(*n*=27,MSWD=0.37),属于中三叠统拉丁阶;②长7下部凝灰岩为隐晶质长英矿物集合体,以石英、长石和伊利石为主(>92%),含少量铁白云石、菱铁矿、黄铁矿和绿泥石;③长7下部凝灰岩稀土元素分配模式为负Eu异常的右倾型曲线;Ba、Nb、Sr、Eu相对亏损,Th、U、Pb、Zr、Hf、Li相对富集,来源于大陆花岗岩环境。

(2)结合前人对延长组年代学、古生物和沉积环境等方面研究和本次锆石U-Pb定年结果,对延长组地层年代进行了厘定,将长7³的顶部(即“张家滩页岩”顶部)作为延长组第2段和第3段的分界,同

时也是中晚三叠世的界线。建议仍沿用延长组这个组名,将 T_{3y} 改为 T_{2-3y} 。

(3)综合认为,鄂尔多斯盆地延长组长 7 的事件沉积是印支 I 幕构造岩浆活动的响应,西秦岭地区的花岗质岩浆活动与长 7³ 凝灰岩在年龄、分布厚度、岩石组成和构造环境上均具耦合性,认为长 7³ 凝灰岩有可能来自西秦岭的岩浆活动。

References

- Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province, 1989. Regional Geology of Shaanxi Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Black, L.P., Kamo, S.L., Williams, I.S., et al., 2003. The Application of SHRIMP to Phanerozoic Geochronology: A Critical Appraisal of Four Zircon Standards. *Chemical Geology*, 200(1–2): 171–188. doi: 10.1016/s0009-2541(03)00166-9
- Chen, A.Q., Chen, H.D., Hou, M.C., et al., 2011. The Middle-Late Triassic Event Sediments in Ordos Basin: Indicators for Episode I of the Indosinian Movement. *Acta Geologica Sinica*, 85(10): 1681–1690 (in Chinese with English abstract).
- Cohen, K.M., Finney, S.C., Gibbard, P.L., et al., 2013. The ICS International Chronostratigraphic Chart. *Episodes*, 36: 199–204.
- Compilation Committee of Baoji Local Records, 1998. Baoji Local Records, Volume 01. Sanqin Press, Xi'an (in Chinese).
- Corfu, F., 2003. Atlas of Zircon Textures. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53(1): 469–500. doi: 10.2113/0530469
- Deng, X.Q., Li, W.H., Liu, X.S., et al., 2009. Discussion on the Stratigraphic Boundary between Middle Triassic and Upper Triassic. *Acta Geologica Sinica*, 83(8): 1089–1096 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X.Q., Lin, F.X., Liu, X.Y., et al., 2008. Discussion on Relationship between Sedimentary Evolution of the Triassic Yanchang Formation and the Early Indosinian Movement in Ordos Basin. *Journal of Palaeogeography*, 10(2): 159–166 (in Chinese with English abstract).
- Deng, X.Q., Luo, A.X., Zhang, Z.Y., et al., 2013. Geochronological Comparison on Indosinian Tectonic Events between Qinling Orogeny and Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 31(6): 939–953 (in Chinese with English abstract).
- Desmares, D., Grosheny, D., Beaudoin, B., et al., 2007. High Resolution Stratigraphic Record Constrained by Volcanic Ash Beds at the Cenomanian-Turonian Boundary in the Western Interior Basin, USA. *Cretaceous Research*, 28(4): 561–582. doi: 10.1016/j.cretres.2006.08.009
- Du, G., Wang, K.Y., Ran, J., et al., 2014. Application of IR/SEM and Other Modern Instruments for Mineral Identification. *Rock and Mineral Analysis*, 33(5): 625–633 (in Chinese with English abstract).
- Fan, L.P., 2014. Study on the South of Erdos Basin Sedimentary Characteristics and Pore Development of Chang 7 Mud Shale (Dissertation). Xi'an Shiyou University, Xi'an (in Chinese with English abstract).
- Feng, Y.M., Cao, X.D., Zhang, E.P., et al., 2003. Tectonic Evolution Framework and Nature of the West Qinling Orogenic Belt. *Northwestern Geology*, 36(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Fromaget, J., 1934. Observations et Reflexions Sur la Géologie Stratigraphique et Structurale de L'Indoechine. *Bulletin Société Géologie* 4, 101–164 (in French).
- Fuller, M.L., Clapp, F.G., 1926. Formations of the North Shensi Basin, China. *The Journal of Geology*, 34(5): 434–440. doi: 10.1086/623330
- Guo, X.Q., Yan, Z., Wang, Z.Q., et al., 2011. Geological Characteristics and Associated Magmatic Ages of the Xiekeng Skarn-Type Cu-Au Deposit in the West Qinling Terrane. *Acta Petrologica Sinica*, 27(12): 3811–3822 (in Chinese with English abstract).
- Hu, Y.H., Liu, J., Zhou, M.Z., et al., 2009. An Overview of Ordovician and Silurian K-Bentonites. *Geochimica*, 38(4): 393–404 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H., Yang, J.H., Du, Y.S., et al., 2012. LA-ICPMS U-Pb Dating of Zircons from Tuffs of the Upper Permian-Middle Triassic in Youjiang Basin, Guangxi Province and its Geological Significance. *Earth Science*, 37(1): 125–138 (in Chinese with English abstract).
- Huang, S.J., Huang, K.K., Feng, W.L., et al., 2009. Mass Exchanges among Feldspar, Kaolinite and Illite and Their Influences on Secondary Porosity Formation in Clastic Diagenesis—A Case Study on the Upper Paleozoic, Ordos Basin and Xujiahe Formation, Western Sichuan Depression. *Geochimica*, 38(5): 498–506 (in Chinese with English abstract).
- Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1980. The Mesozoic Paleontology in Shan-Gan-Ning Basin (Volume 01). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Jin, W.J., Zhang, Q., He, D.F., et al., 2005. Shrimp Dating of Adakites in Western Qinling and Their Implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3): 959–966 (in Chinese with English abstract).

- Li, Y. G., Wang, S. S., Liu, M. W., et al., 2015. U-Pb Dating Study of Baddeleyite by LA-ICP-MS: Technique and Application. *Acta Geologica Sinica*, 89(12): 2400–2418 (in Chinese with English abstract).
- Li, Y. H., 2014. Triassic Oil Shale and the Associated Gas in Tongchuan-Huangling Area, Shaanxi Province. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Li, Z. H., Feng, S. B., Yuan, X. Q., et al., 2014. Chronology and Its Significance of the Lower Jurassic Tuff in Ordos Basin and Its Periphery. *Oil & Gas Geology*, 35(5): 729–741 (in Chinese with English abstract).
- Luo, B. J., Zhang, H. F., Xiao, Z. Q., 2012. Petrogenesis and Tectonic Implications of the Early Indosinian Meiwu Pluton in West Qinling, Central China. *Earth Science Frontiers*, 19(3): 199–213 (in Chinese with English abstract).
- Ma, R. H., 1998. Lithostratigraphy of Shaanxi Province. China University of Geosciences Press, Wuhan (in Chinese).
- National Commission on Stratigraphy of China, 2012. China Stratigraphic Chart (Trial Draft). Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Pan, Z. X., 1936. Book Two of Mesozoic Plants Fossil in Northern Shaanxi Province (Paleontology Records in China, Type A, 4). Industry Branch, National Institute of Beiping, Beijing (in Chinese).
- Pearce, J. A., 1995. Tectonic Implications of the Composition of Volcanic Arc Magmas. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1): 251–285. doi: 10.1146/annurev.earth.23.1.251
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W., Tindle, A. G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, 25(4): 956–983. doi: 10.1093/petrology/25.4.956
- Pidgeon, R. T., Nemchin, A. A., Hitchen, G. J., 1998. Internal Structures of Zircons from Archaean Granites from the Darling Range Batholith: Implications for Zircon Stability and the Interpretation of Zircon U-Pb Ages. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132(3): 288–299. doi: 10.1007/s004100050422
- Qin, Y. J., Du, Y. S., Mou, J., et al., 2015. Geochronology of Neoproterozoic Xiajiang Group in Southeast Guizhou, South China, and Its Geological Implications. *Earth Science*, 40(7): 1107–1120 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. W., Liu, C. Y., Li, Y. H., et al., 2009. Distribution Characteristics and Geological Significances of Tuff Interlayers in Yanchang Formation of Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(6): 1138–1146 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, X. W., Liu, C. Y., Mao, G. Z., et al., 2011. Petrological Geochemical Characteristics of Volcanic Ash Sediments in Yanchang Formation in Ordos Basin. *Earth Science*, 36(1): 139–150 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., 1984. Indosinian Movement and Its Significance in the Tectonic Evolution of China. *Chinese Academy of Geological Sciences Sinica*, 9: 31–34 (in Chinese).
- Rubatto, D., Gebauer, D., 2000. Use of Cathodoluminescence for U-Pb Zircon Dating by Ion Microprobe: Some Examples from the Western Alps. In: *Cathodoluminescence in Geoscience*. Springer Brilin-Verlag, Heidelberg, 373–400. doi: 10.1007/978-3-662-04086-7_15
- Sun, S. S., McDonough, W. F., 1989. Chemical and Isotopic Systematics of Oceanic Basalts: Implications for Mantle Composition and Processes. *Geological Society, London, Special Publications*, 42(1): 313–345. doi: 10.1144/gsl.sp.1989.042.01.19
- Vavra, G., Gebauer, D., Schmid, R., et al., 1996. Multiple Zircon Growth and Recrystallization during Polyphase Late Carboniferous to Triassic Metamorphism in Granulites of the Ivrea Zone (Southern Alps): An Ion Microprobe (SHRIMP) Study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122(4): 337–358. doi: 10.1007/s004100050132
- Wang, D. Y., Xin, B. S., Yang, H., et al., 2014. Zircon SHRIMP U-Pb Age and Geological Implications of Tuff at the Bottom of Chang-7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin. *Science China Earth Sciences*, 57(12): 2966–2977. doi: 10.1007/s11430-014-4979-0
- Wang, F., Tian, J. C., Fan, L. Y., et al., 2010. Evolution of Sedimentary Fillings in Triassic Yanchang Formation and its Response to Indosinian Movement in Ordos Basin. *Natural Gas Geoscience*, 21(6): 882–889 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F. M., Liao, Q. A., Fan, G. M., et al., 2014. Geological Implications of Unconformity between Upper and Middle Devonian, and 346.8 Ma Post-Collision Volcanic Rocks in Karamaili, Xinjiang. *Earth Science*, 39(9): 1243–1257 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H. Z., 1981. Geotectonic Units of China from the Viewpoint of Mobilism. *Earth Science*, (01): 42–66 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P., Zhou, Q., Du, Y. S., et al., 2016. Characteristics of Pyrite Sulfur Isotope of Mn Deposit from Datangpo Formation in Songtao Area, East Guizhou Province and Its Geological Significance. *Earth Science*, 41(12): 2031–2040 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. M., 1996. Coal Accumulating Law and Resource Assessment in Ordos Basin. Coal Industry Press, Beijing (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- Chinese).
- Wang, T. F., 2004. Outline of Geotectonics in China. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Wang, X. F., Chen, X. H., 2005. Stratigraphic Division and Correlation of Each Geological Era in China. Geological Publishing House, Beijing(in Chinese).
- Wang, X. W., 1996. Discussion on Characteristics of Indosinian Movement in North China Carton. *Earth Science*, 21(4): 449—454 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. X., Wang, T., Zhang, C. L., 2015. Granitoid Magmatism in the Qinling Orogen, Central China and Its Bearing on Orogenic Evolution. *Science China Earth Sciences*, 58(9): 1497—1512. doi: 10.1007/s11430-015-5150-2
- Wu, Y. B., Zheng, Y. F., 2004. Zircon Genetic Mineralogy and Its Constrain for Interpretation of U-Pb Age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589—1604 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. Y., 2007. Sedimentary Record of Mesozoic Intracontinental Deformation in the South Ordos Basin, China (Dissertation). University of Wyoming, Laramie.
- Yang, H., Zhang, W. Z., 2005. Leading Effect of the Seventh Member High-Quality Source Rock of Yanchang Formation in Ordos Basin during the Enrichment of Low-Penetrating Oil-Gas Accumulation: Geology and Geochemistry. *Geochimica*, 34(2): 147—154 (in Chinese with English abstract).
- Yang, J. H., 2012. Detrital Record of Collision and Exhumation Processes of Orogen(Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan(in Chinese with English abstract).
- Yang, J. J., 2012. Tectonic Evolution and Distribution of Oil and Gas in the Ordos Basin. Petroleum Industry Press, Beijing(in Chinese).
- Zhang, H., Peng, P. G., Zhang, W. Z., 2014. Zircon U-Pb Ages and Hf Isotope Characterization and Their Geological Significance of Chang 7 Tuff of Yanchang Formation in Ordos Basin. *Acta Petrologica Sinica*, 30(2): 565—575 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. W., Meng, Q. R., Yu, Z. P., et al., 1996. Orogenesis and Dynamics of the Qinling Orogeny. *Science China Earth Science*, 39(3): 225—234. Doi: 10.1360/yd1996-3-225
- Zhang, W. Z., Yang, H., Peng, P. A., et al., 2009. The Influence of Late Triassic Volcanism on the Development of Chang 7 High Grade Hydrocarbon Source Rock in Ordos Basin. *Geochimica*, 38(6): 573—582 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. H., 1997. Geochemical Principle of Trace Elements. Science Press, Beijing(in Chinese).
- 宝鸡市地方志编纂委员会, 1998. 宝鸡市志上. 西安: 三秦出版社.
- 陈安清, 陈洪德, 侯明才, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地中一晚三叠世事件沉积对印支运动 I 幕的指示. *地质学报*, 85(10): 1681—1690.
- 邓秀芹, 李文厚, 刘新社, 等, 2009. 鄂尔多斯盆地中三叠统与上三叠统地层界线讨论. *地质学报*, 83(8): 1089—1096.
- 邓秀芹, 蔺昉晓, 刘显阳, 等, 2008. 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. *古地理学报*, 10(2): 159—166.
- 邓秀芹, 罗安湘, 张忠义, 等, 2013. 秦岭造山带与鄂尔多斯盆地印支期构造事件年代学对比. *沉积学报*, 31(6): 939—953.
- 杜谷, 王坤阳, 冉敬, 等, 2014. 红外光谱/扫描电镜等现代大型仪器岩石矿物鉴定技术及其应用. *岩矿测试*, 33(5): 625—633.
- 范琳沛, 2014. 鄂尔多斯盆地南部长 7 泥页岩沉积学特征与孔隙发育研究(硕士学位论文). 西安: 西安石油大学.
- 冯益民, 曹宣铎, 张二朋, 等, 2003. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质. *西北地质*, 36(1): 1—10.
- 郭现轻, 闫臻, 王宗起, 等, 2011. 西秦岭谢坑矽卡岩型铜金矿床地质特征与矿区岩浆岩年代学研究. *岩石学报*, 27(12): 3811—3822.
- 胡艳华, 刘健, 周明忠, 等, 2009. 奥陶纪和志留纪钾质斑脱岩研究评述. *地球化学*, 38(4): 393—404.
- 黄虎, 杨江海, 杜远生, 等, 2012. 右江盆地上二叠统一中三叠统凝灰岩年龄及其地质意义. *地球科学*, 37(1): 125—138.
- 黄思静, 黄可可, 冯文立, 等, 2009. 成岩过程中长石、高岭石、伊利石之间的物质交换与次生孔隙的形成: 来自鄂尔多斯盆地上古生界和川西凹陷三叠系须家河组的研究. *地球化学*, 38(5): 498—506.
- 金维浚, 张旗, 何登发, 等, 2005. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义. *岩石学报*, 21(3): 959—966.
- 李艳广, 汪双双, 刘民武, 等, 2015. 斜锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年方法及应用. *地质学报*, 89(12): 2400—2418.
- 李玉宏, 2014. 陕西省铜川—黄陵地区三叠系油页岩及伴生油气资源. 北京: 地质出版社.
- 李振宏, 冯胜斌, 袁效奇, 等, 2014. 鄂尔多斯盆地及其周缘下侏罗统凝灰岩年代学及意义. *石油与天然气地质*, 35(5): 729—741.
- 刘宪亭, 1962. 陕北的弓鲛化石二新种. 古脊椎动物与古人类, (2): 150—156.
- 骆必继, 张宏飞, 肖尊奇, 2012. 西秦岭印支早期美武岩体的岩石成因及其构造意义. *地学前缘*, 19(3): 199—213.
- 马润华, 1998. 陕西省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社.
- 潘钟祥, 1936. 陕北古期中生代植物化石(中国古生物志甲种

- 四号)第二册,北京:国立北平研究院实业部,1—49.
- 邱欣卫,刘池洋,李元昊,等,2009.鄂尔多斯盆地延长组凝灰岩夹层展布特征及其地质意义.沉积学报,27(6):1138—1146.
- 邱欣卫,刘池洋,毛光周,等,2011.鄂尔多斯盆地延长组火山灰沉积物岩石地球化学特征.地球科学,36(1):139—150.
- 全国地层委员会,2012.中国地层表(试用稿).北京:地质出版社.
- 陕西省地质矿产局,1989.陕西省区域地质志.北京:地质出版社.
- 覃永军,杜远生,牟军,等,2015.黔东南地区新元古代下江群的地层年代及其地质意义.地球科学,40(7):1107—1120.
- 万天丰,2004.中国大地构造学纲要.北京:地质出版社.
- 汪啸风,陈孝红,2005.中国各地质时代地层划分与对比.北京:地质出版社.
- 汪新文,1996.华北克拉通印支运动及其与早中生代盆地发育的关系.地球科学,21(4):449—454.
- 王峰,田景春,范立勇,等,2010.鄂尔多斯盆地三叠系延长组沉积充填演化及其对印支构造运动的响应.天然气地球科学,21(6):882—889.
- 王富明,廖群安,樊光明,等,2014.新疆卡拉麦里上一中泥盆统间角度不整合和346.8 Ma后碰撞火山岩的意义.地球科学,39(9):1243—1257.
- 王鸿祯,1981.从活动论观点论中国大地构造分区.地球科学,1(1):42—66.
- 王双明,1996.鄂尔多斯盆地聚煤规律及煤炭资源评价.北京:煤炭工业出版社.
- 吴元保,郑永飞,2004.锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约.科学通报,49(16):1589—1604.
- 杨华,张文正,2005.论鄂尔多斯盆地长_7段优质油源岩在低渗透油气成藏富集中的主导作用:地质地球化学特征.地球化学,34(2):147—154.
- 杨江海,2012.造山带碰撞—隆升过程的碎屑沉积响应(博士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 杨俊杰,2002.鄂尔多斯盆地构造演化与油气分布规律.北京:石油工业出版社.
- 张辉,彭平安,张文正,2014.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.岩石学报,30(2):565—575.
- 张文正,杨华,彭平安,等,2009.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.地球化学,38(6):573—582.
- 赵振华,1997.微量元素地球化学原理.北京:科学出版社.
- 中国地质科学院地质研究所,1980.陕甘宁盆地中生代地层古生物(上).北京:地质出版社.