

文章编号:1000-0550(2017)04-0691-14

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.04.004

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

王建强^{1,2}, 刘池洋^{1,2}, 李行^{1,2}, 吴桐桐^{1,2}, 吴经理^{1,2}

1. 西北大学地质系, 西安 710069

2. 西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069

摘要 鄂尔多斯盆地南部延长组长7段优质烃源岩以含众多凝灰岩夹层为显著特点, 其中长7段底部长7₃层凝灰岩最为发育。凝灰岩的形成时代及火山物质来源, 对探讨延长期湖盆优质烃源岩形成、富烃凹陷发育及周邻同期构造—岩浆事件等均具有重要的意义。本文以盆地南部铜川何家坊剖面长7₃层凝灰岩夹层为重点研究对象, 利用岩石薄片、扫描电镜及主微量元素等方法, 明确了该区凝灰岩岩石学和地球化学特征; 同时对凝灰岩夹层及其间的砂岩层开展了锆石 U-Pb 定年。结果表明该区凝灰岩蚀变强烈, 但仍具凝灰岩结构及中酸性火山岩特点; 获得的两个凝灰岩样品主组分加权平均年龄分别是(226.5±1.6) Ma($n=24$)和(229.7±2.2) Ma($n=21$), 同期砂岩碎屑锆石最年轻组分为235~243 Ma($n=7$, 加权平均年龄239.3 Ma)。结合前人研究成果, 综合认为长7₃层凝灰岩形成年龄约在230 Ma±, 代表了长7期开始的时间, 也是延长期湖盆进入鼎盛发育和盆地拗陷型富烃凹陷形成的时期。依据延长期凝灰岩特征, 盆地腹地及秦岭造山带构造—岩浆活动事件, 指出延长组长7期凝灰岩的火山物质主要来自秦岭造山带, 与勉略洋壳向南秦岭板块下俯冲形成的岛弧火山等联系密切, 并将秦岭造山带与延长期湖盆之间的耦合响应过程划分为3个阶段。本文对重新认识鄂尔多斯盆地发育演化过程及长7期湖盆属性具有重要的指示意义。

关键词 鄂尔多斯盆地; 延长期; 凝灰岩; 锆石 U-Pb 定年; 秦岭造山带

第一作者简介 王建强, 男, 1981年生, 博士, 讲师, 盆地地质与油气勘探, E-mail: wjq@nwu.edu.cn

中图分类号 P597 P542 **文献标识码** A

凝灰岩属火山碎屑岩类, 由火山喷发物质经风力或水体搬运, 在沉积区沉积而形成的有凝灰质结构的岩石, 具火成岩与沉积岩的特性。凝灰岩形成的瞬时性和沉积的同时性决定了其可作为地层划分对比的重要标志层^[1-2], 它在沉积地层中的保存也指示了地质历史时期曾发生火山活动等事件, 因而其年代学的研究, 不仅可精确限定其赋存地层的沉积时代, 也可建立同期地质活动事件序列及恢复古环境^[3], 亦可作为连接构造活动区与沉积区的重要纽带。

鄂尔多斯盆地南部延长组以夹众多层凝灰岩为其重要特征, 一直以来是其地层划分对比的重要依据。近来研究表明, 延长组凝灰岩夹层不但是同期构造火山活动的沉积产物^[4-5], 进一步分析发现其与延长组优质烃源岩发育、富烃凹陷形成存在较密切的联系^[4,6], 同时对油藏也可能产生一定的影响^[7]。前人利用大量测井及露头剖面资料, 已较系统的揭示了延

长期凝灰岩的产状、展布特点^[4,8-9], 借助多种测试手段分析了其岩石学、矿物学及元素地球化学等特征^[4-5,8,10-11], 指出了延长组凝灰岩主要发育在长9—长7段, 以长7₃层(长7段底部)最为发育, 以中酸性火山岩为主。但对凝灰岩的物质来源讨论较少, 对其发育时代的定量性研究则更少。近年来, 随着同位素年代学分析技术的发展, 陆续对鄂尔多斯盆地延长期凝灰岩进行了年代学研究^[9,12-13], 但不同学者得出的结果存在明显差异, 为此对其形成时代目前仍存在较多争议, 值得进一步研究。对其形成时代的确定, 无论对明确凝灰岩物质的来源, 限定延长组时代、揭示延长期湖盆发育演化和富烃凹陷形成的时空格局及探讨区域构造事件等均具有重要的意义。

为此, 本文以鄂尔多斯盆地南部延长组典型剖面——铜川何家坊露头剖面为研究对象, 以长7段长7₃层凝灰岩形成时代为主线, 以岩石地球化学及

收稿日期: 2016-05-11; 收修改稿日期: 2016-09-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330315, 41102067); 陕西省教育厅基金项目(14JK1732); 国家科技重大专项(2011ZX05001004-001); 中国地质调查局项目(12120114009201) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41330315, 41102067; Education Fund Project of Shaanxi Province, No.14JK1732; National Science and Technology Major Project, No.2011ZX05001004-001; Geological Survey Project of China, No.12120114009201]

锆石 U-Pb 年代学分析为主要研究手段,同时综合前人相关研究成果,探讨了延长期长 7 段凝灰岩的形成时代、物质来源及其地质意义。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北板块西部,为我国大型中生代克拉通内沉积盆地,盆地周边隔新生代地堑被群山所环绕,其南为秦岭造山带,西南为北祁连造山带(图 1)。鄂尔多斯盆地发育时限为中三叠世—早白垩世,晚白垩世以来为后期改造阶段,现今为遭受多种形式改造的残留盆地^[14],残存面积约 $25 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

中晚三叠世延长期是鄂尔多斯盆地发育的鼎盛时期,原始盆地地貌恢复揭示,延长期盆地沉积范围广阔,为今残留盆地面积的 2 倍之多^[14]。盆地南部为多期沉积—沉降的中心,延长组生储油条件良好,含有丰富的石油资源,是盆地最重要的富烃凹陷^[6],延长组保存有众多层凝灰岩夹层,在长 9—长 1 段均有分布,单层厚度从几毫米到几十厘米不等,累计厚

度可达 30~3 m,其中长 7₃层既是全盆地主力优质烃源层,同时也是凝灰岩最发育的层段^[8]。

盆地南部铜川何家坊地区延长组长 7 段暗色泥页岩、油页岩极其发育(图 1),延长期该区为深湖盆地,自晚白垩世以来遭受了强烈抬升剥蚀。目前,该区延长组已剥露至地表。本次采集样品的剖面就位于何家坊村东山坡半山腰处一个废弃采矿场,前人曾利用此处的油页岩进行土法炼油,挖开处可见岩层厚度约 6.5~7 m(图 1),主体以黑色页岩为主,夹中薄层到极薄层细砂及粉砂岩,此外,在该剖面可观察到岩层中夹多层灰黄、土黄色似黏土岩(自下而上至少有 30 余层),普遍为薄层及纹层,厚度一般小于 1 cm,特征鲜明,这就是延长组中普遍发育的凝灰岩。通过剖面岩性特征及其与上、下地层接触关系,可明确该层段为延长组内典型的“张家滩”页岩段,可与延长组长 7₃层对比。

2 样品采集及实验方法

铜川何家坊剖面凝灰岩主体以水平薄层状分布

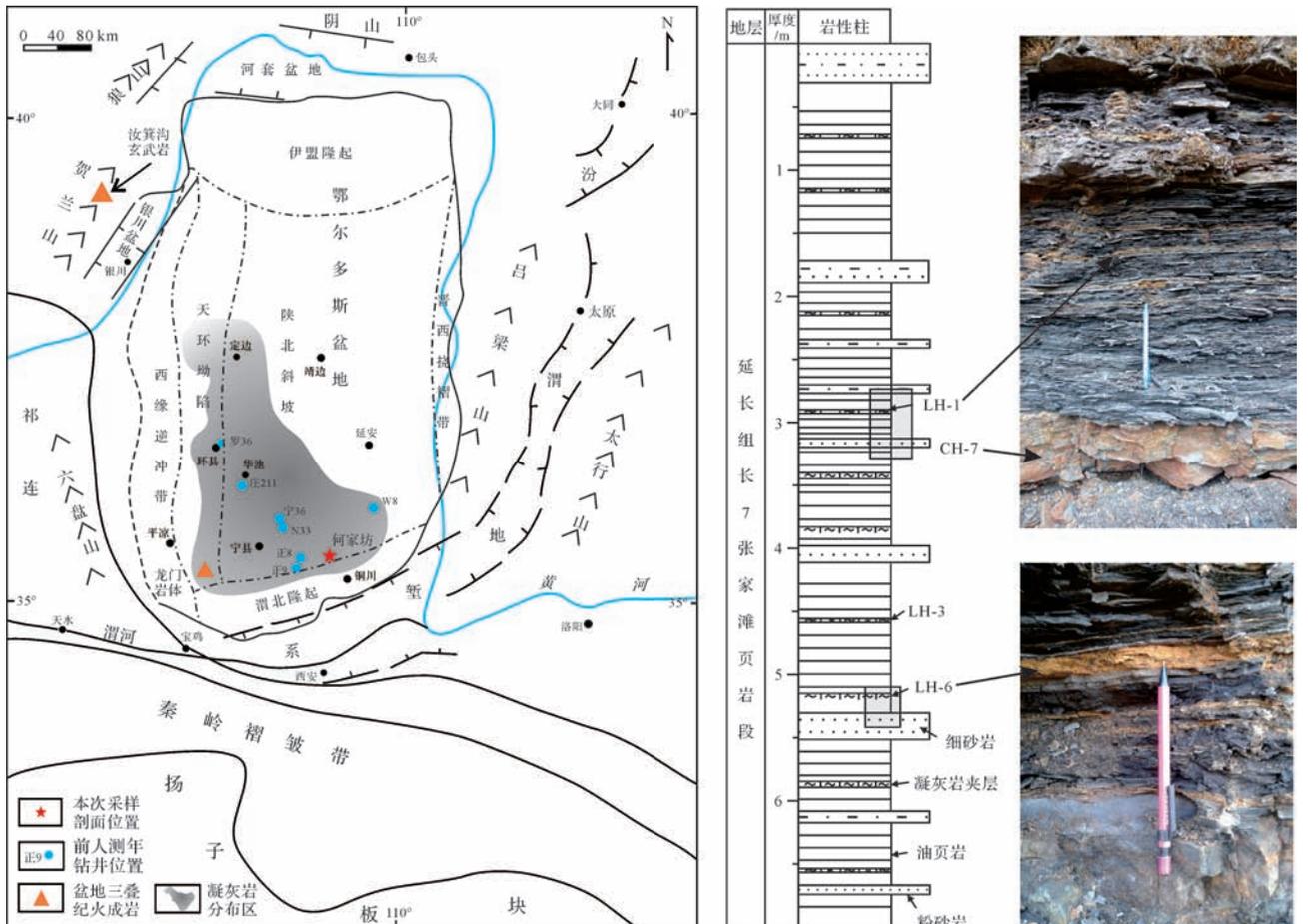


图 1 研究区区域地质特征及何家坊剖面采样位置图

Fig.1 Regional geological characteristics of the study area and sampling location in Hejiafang outcrop columnar section

于黑色泥页岩之中(图1)。岩层表面遭受了风化淋漓,凝灰岩已呈黏土状,但挖开后内部新鲜面保存较好,由于凝灰岩层很薄,在样品采集过程中还要尽可能地排除砂泥岩物质的混染,为此样品收集难度较大。本次研究自上而下总共采集了2个凝灰岩样品及1件砂岩夹层样品(图1)。筛选处理后,对该剖面的凝灰岩样品进行岩石薄片、扫描电镜、元素地化及锆石 U-Pb 定年等分析测试,对砂岩样品开展了碎屑锆石 U-Pb 定年。

除薄片制作及锆石矿物分离外,所有分析测试均在大陆动力学国家重点实验室(西北大学)完成。其中,常量元素采用 X 荧光光谱分析仪(XRF)法测定;微量、稀土元素在 Elan6100DRC 电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)完成,结果见(表1);锆石 U-Pb 定年采用的激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas 200 M,斑束直径为 30 μm ,数据处理采用 glitter (ver 4.0) 程序,年龄分析采用国际标准锆石 91500 作为外标标准物质,元素含量采用 NIST 610 作为外标,Si 作为内标,最后利用 Isoplot3 (2006) 程序进行相关图件的制作,结果数据见(表2)。

3 岩石学及地化特征

3.1 岩石显微特征

凝灰岩薄片镜下特征显示,其表面比较污浊,但仍可见少量周缘已被蚀变的晶屑、玻屑(图2a,b,c);斑晶从棱角状到似圆形状均有存在,分选一般,主要为长石,长度小于 0.5 mm,普遍发生了黏土化,少量

石英晶屑呈颗粒状,总体特征显示该区凝灰岩经历了比较强烈的蚀变,黏土岩化严重,具斑脱岩特征。扫描电镜分析表现为以黏土矿物为主,主要为巢状或蜂窝状伊—蒙混层(图2d,e),其次为鳞片状伊利石(图2f)等。

3.2 元素地化特征

两样品(LH-1, LH-6)的岩石化学成分分析结果显示(表1),该剖面凝灰岩样品 SiO_2 含量在 51.79%~54.17%,显示出中基性特点, Al_2O_3 含量(15.30%~18.36%)、 TFe_2O_3 含量(11.40%~13.36%)较高,而 MgO 含量(0.93%~1.44%)较低, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量(1.83%~2.0%)中等, TiO_2 含量介于 0.15%~0.25%。主量元素特征与盆地西南部长 7₃ 层钻井岩芯凝灰岩样品特征(SiO_2 含量一般在 53%~66%,以中酸性为主,低 TFe_2O_3 普遍<4%,高钾>3%等^[45])存在一定的差异,这可能与该区凝灰岩遭受强烈蚀变有关。稀土元素总含量较高, $\Sigma\text{REE} = (261 \sim 315.2) \times 10^{-6}$,表现出 LREE 相对富集、HREE 相对亏损,LREE/HREE 比值介于 11~13.1,元素分馏明显 $(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}} = 13.89 \sim 15.14$,稀土元素球粒陨石标准化后配分曲线呈右倾型(图3左),具明显的 Eu 负异常($\delta\text{Eu} = 0.14 \sim 0.2$);从微量元素可以看到,元素 Ba、Rb、Th、Sr 等含量高(表1),具有火成岩的特点。Nb/Y-Zr/ TiO_2 图解显示延长组凝灰岩主要落入了流纹岩及流纹英安岩—英安岩区,说明该凝灰岩具有中酸性喷出岩特征(图3右),与前人对钻井岩芯的分析结果较为一致。

综上所述,铜川何家坊剖面延长组长7₃层凝灰

表1 研究区凝灰岩主量(%)及微量元素(10^{-6})含量

Table 1 Major and trace element content of tuff in the study area

	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	TFe_2O_3	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	P_2O_5	LOI	TOTAL
LH-1	54.17	0.15	18.36	11.40	0.01	1.44	0.84	0.25	1.58	0.43	10.65	99.28
LH-6	51.79	0.25	15.30	13.36	0.05	0.93	1.15	0.91	1.09	1.61	9.20	95.64
	Li	Be	Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	Rb
LH-1	10.1	1.37	7.83	55.1	12.4	2.03	3.13	13.2	17.0	31.6	1.33	75.2
LH-6	18.6	1.74	14.3	234	45.5	8.03	9.01	27.8	97.0	25.7	1.19	59.4
	Sr	Y	Zr	Nb	Cs	Ba	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu
LH-1	510	33.7	236	11.2	6.46	387	59.8	114	12.6	44.5	7.86	1.00
LH-6	2 076	26.0	143	5.52	9.18	896	54.5	132	18.6	73.6	12.0	2.04
	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Pb	Th
LH-1	6.65	0.98	5.98	1.17	3.30	0.46	2.90	0.40	7.72	1.32	22.0	18.5
LH-6	8.32	1.10	5.89	1.03	2.80	0.38	2.42	0.34	4.18	0.67	9.27	15.7
	U	ΣREE	LREE/HREE	δEu	δCe	$(\text{La}/\text{Yb})_{\text{N}}$	$(\text{Gd}/\text{Lu})_{\text{N}}$					
LH-1	6.72	261.6	11	0.14	4.15	13.89	2.13					
LH-6	9.00	315.2	13.1	0.20	4.16	15.14	3.15					

表2 凝灰岩及砂岩碎屑锆石 U-Pb 定年分析结果

Table 2 U-Pb isotopic data for zircon obtained from tuff and detrital rock

测点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值 (1σ)						表面年龄 (1σ)/Ma					
	Th	U		Pb^{207}/Pb^{206}		Pb^{207}/U^{235}		Pb^{206}/U^{238}		Pb^{207}/Pb^{206}		Pb^{207}/U^{235}		Pb^{206}/U^{238}	
LH-1-1	143.9	314.7	0.5	0.050 5	0.002 4	0.248 7	0.011 1	0.035 7	0.000 6	217	107	226	9	226	4
LH-1-2	413.6	773.6	0.5	0.050 5	0.001 9	0.246 0	0.008 2	0.035 3	0.000 5	219	84	223	7	224	3
LH-1-4	280.9	437.1	0.6	0.050 9	0.002 2	0.248 0	0.009 9	0.035 3	0.000 5	235	97	225	8	224	3
LH-1-5	450.7	732.3	0.6	0.051 5	0.002 4	0.249 7	0.010 8	0.035 2	0.000 6	261	104	226	9	223	4
LH-1-6	212.8	328.6	0.6	0.050 8	0.002 3	0.259 2	0.010 6	0.037 0	0.000 6	234	99	234	9	234	4
LH-1-7	91.6	223.3	0.4	0.050 9	0.004 0	0.264 8	0.020 0	0.037 7	0.000 8	236	172	239	16	239	5
LH-1-8	309.6	396.0	0.8	0.050 9	0.002 6	0.255 5	0.012 3	0.036 4	0.000 6	236	114	231	10	231	4
LH-1-9	216.9	360.0	0.6	0.050 7	0.002 9	0.255 7	0.014 0	0.036 6	0.000 6	228	129	231	11	231	4
LH-1-10	497.4	663.7	0.7	0.050 9	0.002 5	0.256 7	0.011 7	0.036 6	0.000 6	234	109	232	9	232	4
LH-1-11	292.5	497.7	0.6	0.051 0	0.002 3	0.253 1	0.010 5	0.036 0	0.000 6	239	100	229	8	228	3
LH-1-12	446.8	913.2	0.5	0.053 9	0.002 7	0.258 3	0.012 0	0.034 7	0.000 6	368	108	233	10	220	4
LH-1-13	277.3	614.3	0.5	0.054 2	0.007 2	0.262 7	0.033 7	0.035 2	0.001 2	377	273	237	27	223	7
LH-1-14	400.9	630.5	0.6	0.050 6	0.002 4	0.249 6	0.010 9	0.035 8	0.000 6	224	106	226	9	226	4
LH-1-15	262.2	429.0	0.6	0.050 6	0.003 6	0.252 1	0.017 0	0.036 2	0.000 7	221	155	228	14	229	4
LH-1-16	354.6	594.0	0.6	0.050 9	0.002 1	0.257 3	0.009 7	0.036 7	0.000 6	234	93	233	8	232	3
LH-1-18	217.6	265.9	0.8	0.050 7	0.002 6	0.254 6	0.012 1	0.036 4	0.000 6	229	113	230	10	230	4
LH-1-19	351.0	512.4	0.7	0.051 0	0.003 5	0.248 7	0.016 3	0.035 4	0.000 7	239	151	226	13	224	4
LH-1-25	227.4	527.3	0.4	0.050 8	0.003 0	0.249 6	0.013 7	0.035 6	0.000 6	233	129	226	11	226	4
LH-1-27	241.2	453.0	0.5	0.051 1	0.003 9	0.250 6	0.018 2	0.035 6	0.000 7	243	165	227	15	226	5
LH-1-28	881.9	1 180.4	0.7	0.053 1	0.004 8	0.263 9	0.022 8	0.036 1	0.000 9	333	191	238	18	228	5
LH-1-29	766.3	742.4	1.0	0.050 7	0.002 6	0.247 4	0.012 1	0.035 4	0.000 6	226	116	224	10	224	4
LH-1-30	273.8	588.8	0.5	0.053 5	0.003 9	0.260 9	0.018 0	0.035 4	0.000 7	348	155	235	15	224	4
LH-1-33	347.9	680.6	0.5	0.050 8	0.003 5	0.243 4	0.015 9	0.034 7	0.000 7	233	151	221	13	220	4
LH-1-34	340.5	839.5	0.4	0.051 8	0.002 8	0.249 9	0.012 7	0.035 0	0.000 6	276	120	227	10	222	4
LH-1-3	327.0	492.5	0.7	0.051 7	0.006 5	0.297 3	0.036 4	0.041 7	0.001 3	273	265	264	29	263	8
LH-1-17	113.8	235.0	0.5	0.051 3	0.003 8	0.285 4	0.020 4	0.040 4	0.000 8	252	163	255	16	255	5
LH-1-22	205.7	287.2	0.7	0.051 2	0.003 4	0.279 5	0.017 7	0.039 6	0.000 8	251	146	250	14	250	5
LH-1-35	369.3	683.3	0.5	0.054 1	0.002 0	0.403 2	0.013 1	0.054 1	0.000 8	374	81	344	9	340	5
LH-6-1	149.3	405.6	0.4	0.050 7	0.003 6	0.254 5	0.017 3	0.036 4	0.000 7	227	156	230	14	230	5
LH-6-2	148.3	361.1	0.4	0.050 8	0.003 3	0.251 5	0.015 6	0.035 8	0.000 7	234	143	228	13	227	4
LH-6-3	136.3	520.4	0.3	0.050 8	0.002 8	0.252 7	0.013 2	0.036 0	0.000 6	234	123	229	11	228	4
LH-6-5	109.2	472.1	0.2	0.051 0	0.002 3	0.265 9	0.011 3	0.037 8	0.000 6	240	103	239	9	239	4
LH-6-8	167.9	466.8	0.4	0.050 9	0.002 5	0.259 5	0.011 9	0.037 0	0.000 6	236	110	234	10	234	4
LH-6-9	122.2	410.8	0.3	0.051 1	0.002 2	0.262 1	0.010 6	0.037 2	0.000 6	244	98	236	8	236	4
LH-6-10	116.7	301.6	0.4	0.050 7	0.003 3	0.248 7	0.015 2	0.035 6	0.000 7	225	142	226	12	226	4
LH-6-11	84.2	223.6	0.4	0.050 8	0.003 2	0.255 7	0.015 3	0.036 5	0.000 7	233	139	231	12	231	4
LH-6-12	382.1	882.1	0.4	0.051 0	0.002 7	0.252 9	0.012 5	0.036 0	0.000 6	239	117	229	10	228	4
LH-6-14	323.5	416.0	0.8	0.051 1	0.003 3	0.256 9	0.015 9	0.036 5	0.000 7	245	143	232	13	231	4
LH-6-15	155.6	328.5	0.5	0.051 3	0.003 3	0.254 6	0.015 4	0.036 0	0.000 7	252	140	230	12	228	4
LH-6-16	80.3	208.2	0.4	0.050 9	0.003 7	0.266 0	0.018 7	0.037 9	0.000 8	236	161	240	15	240	5
LH-6-18	131.4	416.6	0.3	0.055 0	0.003 2	0.264 4	0.014 6	0.034 9	0.000 6	413	125	238	12	221	4
LH-6-19	191.7	546.8	0.4	0.054 1	0.004 0	0.268 4	0.019 2	0.036 0	0.000 8	373	159	241	15	228	5
LH-6-20	202.0	984.5	0.2	0.052 7	0.002 0	0.261 2	0.008 7	0.035 9	0.000 5	318	82	236	7	228	3
LH-6-21	99.9	210.7	0.5	0.053 6	0.003 4	0.277 3	0.016 8	0.037 6	0.000 7	353	137	249	13	238	4
LH-6-22	211.4	478.9	0.4	0.052 2	0.002 6	0.264 9	0.012 1	0.036 8	0.000 6	295	108	239	10	233	4
LH-6-23	230.2	484.5	0.5	0.050 7	0.002 4	0.261 6	0.011 2	0.037 4	0.000 6	229	104	236	9	237	4
LH-6-24	112.5	342.7	0.3	0.051 1	0.003 2	0.259 9	0.015 4	0.036 9	0.000 7	246	137	235	12	234	4
LH-6-25	249.7	759.6	0.3	0.053 9	0.001 7	0.264 6	0.006 9	0.035 6	0.000 5	366	68	238	6	226	3
LH-6-26	176.5	460.0	0.4	0.056 8	0.005 7	0.272 2	0.026 5	0.034 8	0.000 9	483	209	245	21	220	6
LH-6-4	117.8	433.1	0.3	0.051 4	0.002 8	0.281 7	0.014 3	0.039 7	0.000 7	257	119	252	11	251	4
LH-6-6	125.5	262.4	0.5	0.051 3	0.003 0	0.300 7	0.016 6	0.042 5	0.000 8	255	129	267	13	268	5

(续表2)

测点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值(1σ)						表面年龄(1σ)/Ma					
	Th	U		Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶		Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵		Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸		Pb ²⁰⁷ /Pb ²⁰⁶		Pb ²⁰⁷ /U ²³⁵		Pb ²⁰⁶ /U ²³⁸	
LH-6-7	168.1	305.4	0.6	0.051 2	0.002 3	0.280 6	0.011 9	0.039 7	0.000 6	250	102	251	9	251	4
LH-6-13	45.4	147.9	0.3	0.051 1	0.004 6	0.270 8	0.023 5	0.038 4	0.000 9	247	194	243	19	243	5
LH-6-17	74.4	221.5	0.3	0.051 4	0.003 3	0.291 4	0.017 6	0.041 1	0.000 8	261	140	260	14	260	5
LH-6-27	108.4	242.1	0.4	0.051 1	0.004 2	0.269 5	0.021 2	0.038 2	0.000 9	247	178	242	17	242	5
LH-6-28	105.6	332.4	0.3	0.052 8	0.002 4	0.368 4	0.015 1	0.050 6	0.000 8	320	98	318	11	318	5
LH-6-29	92.6	273.4	0.3	0.068 4	0.002 3	1.294 4	0.038 0	0.137 4	0.002 1	879	68	843	17	830	12
LH-6-30	396.8	409.8	1.0	0.055 7	0.001 7	0.479 0	0.012 5	0.062 4	0.000 9	439	67	397	9	390	5
CH-7-01	312.5	582.8	0.5	0.053 0	0.001 5	0.276 9	0.006 7	0.037 9	0.000 5	328	64	248	5	240	3
CH-7-02	223.7	274.3	0.8	0.165 7	0.003 4	10.898 0	0.158 4	0.476 8	0.006 5	2 515	34	2 515	14	2 513	28
CH-7-03	225.6	270.4	0.8	0.051 2	0.002 0	0.280 7	0.010 1	0.039 8	0.000 6	250	88	251	8	251	4
CH-7-04	27.2	73.8	0.4	0.063 8	0.002 7	1.052 4	0.040 3	0.119 6	0.002 0	735	86	730	20	728	12
CH-7-05	232.8	593.6	0.4	0.058 7	0.001 8	0.446 8	0.011 4	0.055 2	0.000 8	555	64	375	8	347	5
CH-7-06	91.6	49.2	1.9	0.157 5	0.005 7	9.882 8	0.333 0	0.455 1	0.010 0	2 429	60	2 424	31	2 418	44
CH-7-07	132.4	188.9	0.7	0.171 9	0.003 7	11.661 4	0.180 3	0.491 8	0.006 9	2577	35	2 578	14	2 578	30
CH-7-08	139.1	268.0	0.5	0.050 9	0.001 9	0.270 1	0.009 2	0.038 5	0.000 6	236	84	243	7	243	4
CH-7-09	59.0	70.3	0.8	0.064 1	0.002 7	1.097 5	0.042 3	0.124 1	0.002 1	745	86	752	20	754	12
CH-7-10	95.6	66.0	1.4	0.057 0	0.002 7	0.572 5	0.025 5	0.072 8	0.001 2	492	102	460	16	453	7
CH-7-11	123.7	327.6	0.4	0.052 7	0.001 7	0.315 9	0.009 2	0.043 5	0.000 6	315	73	279	7	274	4
CH-7-12	207.9	76.1	2.7	0.057 8	0.003 7	0.662 5	0.040 4	0.083 2	0.001 7	521	134	516	25	515	10
CH-7-13	357.4	203.4	1.8	0.062 2	0.002 3	0.943 6	0.031 6	0.110 0	0.001 7	680	77	675	16	673	10
CH-7-14	117.4	262.4	0.4	0.056 0	0.001 6	0.564 6	0.014 0	0.073 1	0.001 0	452	64	455	9	455	6
CH-7-15	110.6	215.0	0.5	0.056 8	0.002 2	0.614 5	0.021 3	0.078 4	0.001 2	483	83	486	13	487	7
CH-7-16	324.1	425.1	0.8	0.053 1	0.001 9	0.275 9	0.008 9	0.037 7	0.000 6	333	80	247	7	238	3
CH-7-17	150.1	277.9	0.5	0.053 9	0.002 9	0.281 2	0.014 2	0.037 8	0.000 7	369	116	252	11	239	4
CH-7-18	155.6	95.7	1.6	0.063 6	0.002 3	1.051 8	0.034 4	0.120 0	0.001 9	727	75	730	17	731	11
CH-7-19	168.0	156.9	1.1	0.063 4	0.002 1	0.994 9	0.029 3	0.113 8	0.001 7	721	69	701	15	695	10
CH-7-20	166.7	343.3	0.5	0.114 6	0.002 5	5.309 6	0.085 3	0.336 1	0.004 6	1 873	39	1 870	14	1 868	22
CH-7-21	229.9	181.5	1.3	0.064 4	0.001 9	1.102 7	0.027 5	0.124 1	0.001 8	756	61	755	13	754	10
CH-7-22	44.3	120.7	0.4	0.104 9	0.002 8	4.390 9	0.098 5	0.303 5	0.004 6	1 713	49	1 711	19	1 709	23
CH-7-23	105.6	203.8	0.5	0.113 2	0.002 4	5.179 9	0.080 8	0.331 9	0.004 5	1 851	38	1 849	13	1 848	22
CH-7-24	70.9	153.8	0.5	0.055 9	0.002 9	0.549 3	0.026 7	0.071 2	0.001 3	449	111	445	17	444	8
CH-7-25	46.5	359.3	0.1	0.067 3	0.001 6	1.301 3	0.024 2	0.140 1	0.001 9	848	49	846	11	845	11
CH-7-26	423.2	663.3	0.6	0.064 5	0.001 4	1.119 5	0.018 3	0.125 9	0.001 7	757	46	763	9	765	10
CH-7-27	190.6	249.8	0.8	0.064 4	0.001 7	1.041 2	0.023 0	0.117 3	0.001 6	754	56	725	11	715	9
CH-7-28	72.8	236.1	0.3	0.164 5	0.003 4	10.756 8	0.151 0	0.474 3	0.006 4	2 502	34	2 502	13	2 502	28
CH-7-29	372.9	472.1	0.8	0.120 0	0.002 5	5.873 6	0.084 4	0.354 9	0.004 7	1 957	36	1 957	12	1 958	22
CH-7-30	110.5	157.3	0.7	0.056 4	0.002 4	0.591 6	0.023 0	0.076 1	0.001 2	467	92	472	15	473	7
CH-7-31	75.5	454.1	0.2	0.115 5	0.002 4	5.403 7	0.078 9	0.339 3	0.004 5	1 888	37	1 885	13	1 883	22
CH-7-32	94.2	322.1	0.3	0.151 4	0.003 3	8.808 2	0.137 5	0.421 8	0.005 8	2 362	36	2 318	14	2 269	26
CH-7-33	39.9	144.5	0.3	0.079 3	0.002 1	2.196 6	0.048 3	0.201 0	0.002 9	1 178	52	1 180	15	1 181	16
CH-7-34	209.1	512.4	0.4	0.067 3	0.001 5	1.319 0	0.021 5	0.142 1	0.001 9	847	45	854	9	857	11
CH-7-36	518.0	994.3	0.5	0.063 5	0.001 7	0.990 6	0.021 8	0.113 1	0.001 6	726	56	699	11	691	9
CH-7-37	180.2	252.0	0.7	0.064 2	0.001 8	1.089 9	0.025 1	0.123 2	0.001 7	747	58	749	12	749	10
CH-7-38	36.8	45.5	0.8	0.115 5	0.003 3	5.085 4	0.124 7	0.319 3	0.005 1	1 888	51	1 834	21	1 786	25
CH-7-39	192.3	342.2	0.6	0.064 7	0.001 7	1.128 6	0.024 9	0.126 6	0.001 8	764	56	767	12	768	10
CH-7-40	62.5	102.4	0.6	0.060 8	0.002 2	0.867 3	0.027 3	0.103 4	0.001 6	633	74	634	15	634	9
CH-7-41	107.2	96.3	1.1	0.065 6	0.002 1	1.199 7	0.033 7	0.132 7	0.002 0	793	66	800	16	803	11
CH-7-42	107.2	116.1	0.9	0.070 2	0.002 4	1.263 1	0.037 9	0.130 4	0.002 0	936	68	829	17	790	11
CH-7-43	253.9	265.8	1.0	0.067 0	0.002 3	1.149 9	0.035 3	0.124 4	0.001 9	839	70	777	17	756	11
CH-7-44	350.5	333.2	1.1	0.168 1	0.003 4	11.181 5	0.156 2	0.482 3	0.006 4	2 539	34	2 538	13	2 537	28
CH-7-45	143.4	210.8	0.7	0.113 6	0.002 5	5.228 5	0.082 1	0.333 8	0.004 5	1 858	39	1 857	13	1 857	22
CH-7-46	220.6	276.3	0.8	0.065 9	0.0018	1.187 7	0.026 7	0.130 8	0.001 8	803	56	795	12	792	10
CH-7-47	548.3	902.7	0.6	0.065 4	0.001 5	1.088 7	0.019 6	0.120 8	0.001 6	786	49	748	10	735	9

(续表 2)

测点号	含量/ 10^{-6}		Th/U	同位素比值(1 σ)						表面年龄(1 σ)/Ma					
	Th	U		Pb^{207}/Pb^{206}		Pb^{207}/U^{235}		Pb^{206}/U^{238}		Pb^{207}/Pb^{206}		Pb^{207}/U^{235}		Pb^{206}/U^{238}	
CH-7-49	177.4	272.2	0.7	0.066 5	0.001 7	1.165 5	0.024 4	0.127 2	0.001 8	821	53	785	11	772	10
CH-7-50	207.3	260.8	0.8	0.168 0	0.003 8	10.306 6	0.174 4	0.445 0	0.006 4	2 538	37	2 463	16	2 373	29
CH-7-51	154.0	141.0	1.1	0.064 0	0.001 9	1.088 5	0.027 0	0.123 4	0.001 8	742	61	748	13	750	10
CH-7-52	284.9	488.5	0.6	0.065 1	0.001 6	1.142 7	0.022 6	0.127 3	0.001 7	777	52	774	11	773	10
CH-7-53	53.8	411.0	0.1	0.115 5	0.002 7	5.072 9	0.092 4	0.318 5	0.004 5	1 888	42	1 832	15	1 782	22
CH-7-54	405.3	522.6	0.8	0.057 8	0.001 6	0.500 5	0.011 4	0.062 8	0.000 9	522	60	412	8	393	5
CH-7-55	60.5	183.2	0.3	0.144 7	0.003 1	8.295 3	0.130 4	0.415 7	0.005 7	2 284	37	2 264	14	2 241	26
CH-7-56	135.0	159.9	0.8	0.069 5	0.002 1	1.106 8	0.029 2	0.115 6	0.001 7	913	62	757	14	705	10
CH-7-58	260.9	543.8	0.5	0.051 0	0.001 5	0.269 1	0.006 8	0.038 2	0.000 5	242	67	242	5	242	3
CH-7-59	405.2	622.7	0.7	0.051 3	0.001 8	0.288 2	0.008 7	0.040 8	0.000 6	253	77	257	7	258	4
CH-7-60	126.4	254.5	0.5	0.056 2	0.002 1	0.564 5	0.018 7	0.072 8	0.001 1	461	80	454	12	453	7
CH-7-61	46.3	84.9	0.5	0.051 4	0.003 1	0.284 4	0.016 4	0.040 2	0.000 7	257	134	254	13	254	4
CH-7-62	88.9	148.2	0.6	0.115 0	0.002 5	5.397 0	0.084 7	0.340 4	0.004 6	1 880	39	1 884	13	1 888	22
CH-7-63	17.0	17.4	1.0	0.105 4	0.003 8	4.450 1	0.144 9	0.306 2	0.005 5	1 722	65	1 722	27	1 722	27
CH-7-64	87.6	204.1	0.4	0.093 7	0.002 6	3.144 4	0.073 1	0.243 4	0.003 6	1 502	52	1 444	18	1 404	19
CH-7-65	73.4	107.9	0.7	0.055 3	0.003 5	0.368 3	0.021 9	0.048 3	0.000 9	423	134	318	16	304	6
CH-7-66	22.6	42.9	0.5	0.064 5	0.004 3	1.152 6	0.073 4	0.129 7	0.002 9	757	134	779	35	786	17
CH-7-67	271.6	270.0	1.0	0.066 5	0.001 8	1.197 5	0.026 9	0.130 6	0.001 8	823	56	799	12	791	10
CH-7-68	105.9	228.3	0.5	0.112 5	0.002 4	5.156 7	0.079 3	0.332 5	0.004 5	1 840	38	1 846	13	1 851	22
CH-7-69	12.4	15.8	0.8	0.063 3	0.005 5	0.936 1	0.078 3	0.107 2	0.002 8	720	174	671	41	656	16
CH-7-70	131.4	207.7	0.6	0.068 4	0.001 9	1.373 6	0.030 6	0.145 8	0.002 0	880	55	878	13	877	11
CH-7-71	14.4	47.2	0.3	0.164 5	0.003 9	10.759 3	0.197 1	0.474 5	0.007 1	2 502	39	2 503	17	2 503	31
CH-7-72	207.0	488.1	0.4	0.051 1	0.001 6	0.261 6	0.007 2	0.0371	0.000 5	245	71	236	6	235	3
CH-7-73	193.0	386.0	0.5	0.051 1	0.001 7	0.268 3	0.007 9	0.038 1	0.000 5	243	76	241	6	241	3
CH-7-74	20.4	38.8	0.5	0.174 9	0.004 5	11.997 7	0.259 7	0.497 6	0.008 2	2 605	43	2 604	20	2 603	35
CH-7-75	79.4	116.1	0.7	0.064 2	0.002 1	1.093 2	0.031 1	0.123 5	0.001 8	748	67	750	15	751	10
CH-7-76	35.3	36.3	1.0	0.105 7	0.004 8	4.193 3	0.180 5	0.287 7	0.006 3	1 727	82	1 673	35	1 630	31
CH-7-77	115.2	127.8	0.9	0.064 1	0.002 0	1.065 8	0.028 0	0.120 7	0.001 7	744	64	737	14	735	10
CH-7-78	90.0	148.3	0.6	0.153 2	0.003 4	9.271 5	0.148 3	0.439 0	0.006 1	2 382	37	2 365	15	2 346	27
CH-7-79	70.8	86.2	0.8	0.066 9	0.002 6	1.278 8	0.045 5	0.138 7	0.002 3	834	80	836	20	838	13
CH-7-80	117.1	574.8	0.2	0.059 4	0.001 5	0.768 5	0.015 0	0.093 8	0.001 3	583	53	579	9	578	7

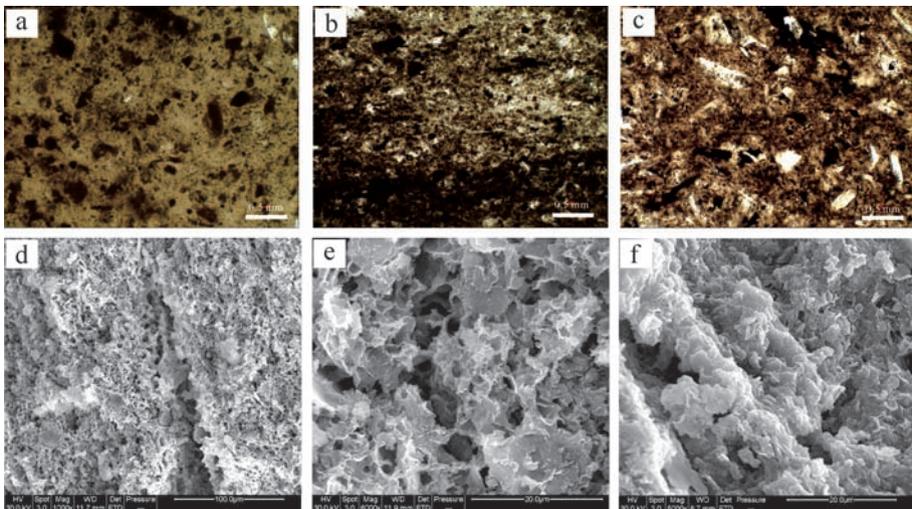


图2 铜川何家坊剖面长7段凝灰岩显微结构特征

a. LH-1,晶屑凝灰岩,蚀变明显;b. LH-6,玻屑凝灰岩,蚀变明显;c. LH-3,晶屑凝灰岩;d. LH-1,巢状蜂窝状伊蒙混层;f. LH-6,鳞片状伊利石

Fig.2 Micro-characteristics of tuff in Chang 7 oil-shale rock of Hejiafang outcrop section

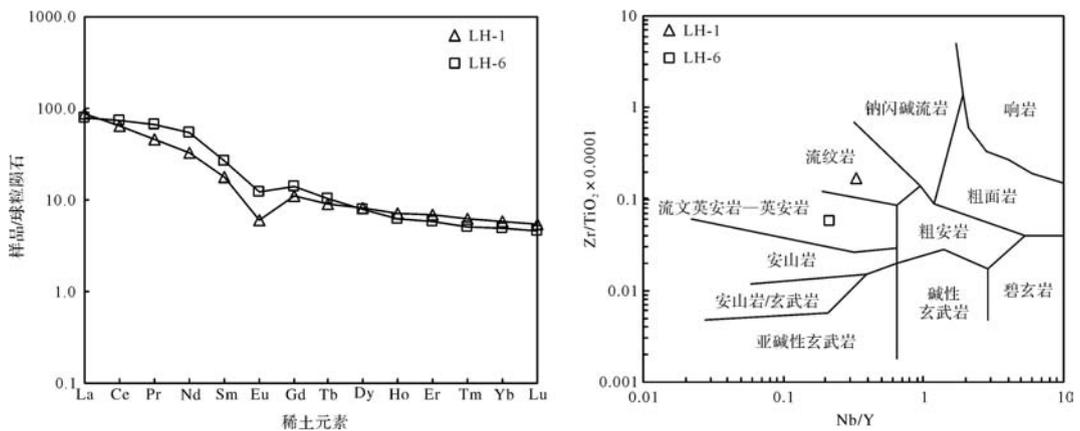


图3 研究区凝灰岩 REE 配分模式(左)(球粒陨石标准化数据据 McLennan^[15])及 Nb/Y-Zr/TiO₂图解(右)

Fig.3 REE distribution pattern and Nb/Y-Zr/TiO₂ diagram of tuff in the study area

岩显微特征显示已发生了较强的蚀变,以黏土矿物为主,主量元素特征与盆地钻井凝灰岩存在一定的差异,笔者认为这可能与该剖面凝灰岩出现较强的蚀变有关,蚀变往往会使得某些不稳定元素发生改变或迁移,进而改变原岩的某些特点。同时,因稀土、微量元素一般比较稳定,为此样品稀土及微量元素特征与盆地钻井岩芯凝灰岩的特点类似,共同显示出具中酸性火山岩的特点。

4 锆石 U-Pb 定年

4.1 锆石成因分析

LH-1、LH-6 两凝灰岩样品锆石的形态及特征较为类似,多为无色透明到浅黄色,呈六方柱或长柱状,晶体长宽比接近 3:1,晶形较小,大部分小于 120 μm,结晶较好,呈自形一半自形。锆石的 CL 图像显示,核幔边界清晰,棱角分明,晶体干净,大部分锆石具有明显的振荡环带(图 4),显示出典型岩浆岩锆石的特点。其中样品 LH-1 锆石的 Th 含量介于 $91.6 \times 10^{-6} \sim 881.9 \times 10^{-6}$ (平均为 335×10^{-6})、U 含量为 $223.3 \times 10^{-6} \sim 1180.4 \times 10^{-6}$ (平均 549.6×10^{-6})、Th/U 比值介于 0.41~1.03 (平均为 0.61); 样品 LH-6 锆石的 Th 含量为 $80.3 \times 10^{-6} \sim 382.1 \times 10^{-6}$ (平均 170.5×10^{-6})、U 含量为 $208.2 \times 10^{-6} \sim 984.5 \times 10^{-6}$ (平均为 461×10^{-6})、Th/U 比值介于 0.21~0.78 (平均为 0.40) (表 2)。已有研究认为,不同成因类型的锆石往往具有不同的 Th、U 含量及 Th/U 比值,一般认为岩浆锆石的 Th、U 含量较高,其比值较大(一般 >0.4); 变质锆石的 Th、U 含量低,比值小(一般 <0.1)^[16]。可见两样品锆石的 Th、U 含量及 Th/U 比值亦符合岩浆岩锆石的

特点。

与前两个凝灰岩样品相比较,砂岩样品(CH-7)的锆石形态和特征复杂多样,有呈短柱状、等粒状、不规则状及长柱状等,大多数锆石为次圆—次棱角状,表明经历了不同程度的搬运磨圆,显示出碎屑锆石的形貌特点。同时锆石粒度较大,普遍大于 100 μm,一般在 150~200 μm,大者可达 300 μm。CL 图像显示,部分锆石具典型的岩浆韵律环带和条带结构,部分锆石结构特征复杂,普遍具明显的增生边(图 4)。锆石的 Th 含量介于 $12.38 \times 10^{-6} \sim 548.27 \times 10^{-6}$ (平均为 159.7×10^{-6})、U 含量为 $15.8 \times 10^{-6} \sim 994.3 \times 10^{-6}$ (平均 262.7×10^{-6})、Th/U 比值介于 0.13~2.73 (平均为 0.71),较凝灰岩样品 Th、U 含量低,且变化较大,总体显示出碎屑锆石的特点。

4.2 锆石年龄特征

锆石 U-Pb 年龄数据分析结果见表 2。其中样品 LH-1 共选择了 35 颗锆石进行了 U-Pb 定年,其中有 7 颗锆石年龄数据的谐和度偏差大于 110% 或小于 90%,未采用。其余的 28 颗锆石,其年龄介于 220.1~339.5 Ma (表 2),进一步可划分为 3 个年龄区间,分别是 220.1~238.7 Ma (24 颗锆石), 250.1~263.2 Ma (3 颗),此外还有 1 颗锆石年龄为 339.5 Ma。主组分的 24 颗锆石年龄加权平均值为 226.5 ± 1.6 Ma (MSWD=1.12) (图 5A)。

样品 LH-6 共选择了 30 颗锆石进行 U-Pb 定年,所有年龄数据的谐和度均在 110%~90% 之间,获得的 30 颗锆石年龄介于 220.4~829.9 Ma (表 2),大致包括 5 个年龄区间,分别是: 220.4~239.9 Ma (21 颗锆石), 241.9~243 Ma (2 颗), 251.3~268.1 Ma (4



图4 研究区凝灰岩及碎屑锆石 CL 图像、测点位置及年龄

Fig.4 CL images, analysis positions and ages of tuff and detrital zircons in the study area

颗), 318.3 ~ 390.3 Ma (2 颗), 此外还有 1 颗年龄为 829.9 Ma。其中主组分锆石加权平均年龄在 229.7 ± 2.2 Ma (MSWD=1.3) (图 5B)。

样品 CH-7 共对 80 颗锆石进行了 U-Pb 定年, 其中有 3 颗锆石年龄数据谐和度偏差大于 10%, 未采用。其余的 77 个锆石年龄介于 235.1 ~ 2605.2 Ma (表 2), 可分成 6 个年龄段, 分别是: 235.1 Ma ~ 243.4 Ma (7 个数据, 峰值年龄为 239.3 Ma), 251.3 ~ 274.6 Ma (4 个数据), 304.3 ~ 486.8 Ma (9 个数据, 峰值 454 Ma), 514.9 ~ 877.1 Ma (32 个年龄, 峰值 759 Ma), 1178.3 ~ 1956.6 Ma (14 数据, 峰值 1884.8 Ma) 及 2284.4 ~ 2605.2 Ma (11 个数据, 峰值年龄 2533.5 Ma) (图 5C)。

从上述 3 个样品的锆石 U-Pb 年龄来看, 两个凝灰岩样品主组分年龄 (也是最小年龄组分) 较为一致, 均显示出单峰值年龄特征, 而砂岩夹层样品显示出碎屑锆石多峰值年龄特点。

5 讨论

5.1 长 7 段底部凝灰岩形成时代

鄂尔多斯盆地延长组长 7 段是凝灰岩层最发育的层段, 分布范围最广, 层数最多, 受到关注和研究的程度最高。近年来, 有关其形成时代被陆续报道, 如邓秀芹等^[9]通过对 W8 井长 7 段上部和 N33 井长 7 段底部 (图 1) 两个凝灰岩样品锆石 U-Pb 定年 (LA-ICPMS), 获得长 7 段上部加权平均年龄为 221.8 ± 2.0 Ma ($n=21$) 和底部加权平均年龄为 228.2 ± 2.0 Ma ($n=27$); 张辉等^[13]对盆地西南部宁 36 井、正 8 井及正 9 井 (图 1) 的长 7 段凝灰岩进行了锆石 U-Pb 定年 (LA-ICPMS), 获得长 7 段凝灰岩锆石结晶的加权平均年龄约为 234 Ma ~ 236 Ma ($n=41$); 王多云等^[12]对盆地西南部罗 36 井和庄 211 井长 7 段底部的凝灰岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 定年 (图 1), 分别获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 241.3 ± 2.4 Ma ($n=11$) 和

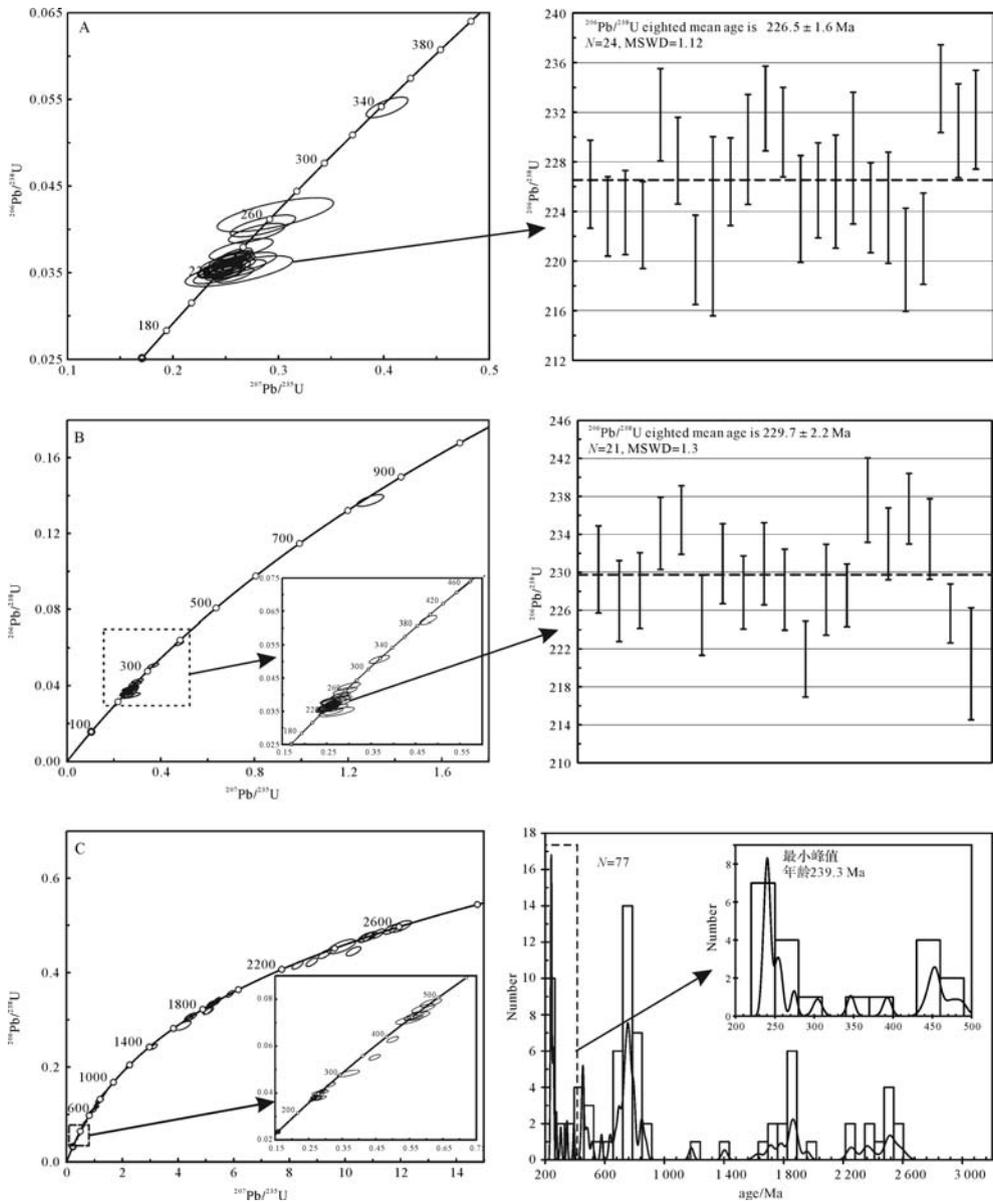


图5 凝灰岩及碎屑锆石 U-Pb 年龄图谱

A. 样品 LH-1 谐和年龄及主组分年龄加权平均图; B. 样品 LH-6 谐和年龄及主组分年龄加权平均图; C. 样品 CH-7 谐和年龄及年龄谱峰频率图。

Fig.5 U-Pb plots of zircon age of tuff and detrital rock

239.7±1.7 Ma (n=13)。从前人测试结果可见,同一研究对象(主要均为长7段底部凝灰岩),仅因测试手段,样品分布位置等不同,其测试结果范围介于228~241 Ma之间,跨中晚三叠世(据2015年国际地层年代表),其跨度之大与凝灰岩瞬时性和等时性的特点显然存在矛盾,也引出了长7段是否为中晚三叠界限之争。

对铜川何家坊露头剖面长7段底部(长7₃层)两个凝灰岩夹层样品进行了锆石 U-Pb 定年,获得年龄

分别是 226.5±1.6 Ma (n=24) 和 229.7±2.2 Ma (n=21) (图 5A, B), 该年龄与邓秀琴等^[9]对长7段底部所测结果(228.2±2.0 Ma)在误差范围内相一致。值得强调的是,本次研究除了对凝灰岩样品进行锆石 U-Pb 定年外,同时亦对该剖面内同期砂岩夹层(CH-7)进行了碎屑锆石 U-Pb 定年,结果显示碎屑锆石年龄介于 235.1~2605.2 Ma 之间,存在 5 个年龄段(图 5C),其中最小年龄段为 235~243 Ma (n=7, 加权平均年龄 239.3 Ma), 占样品碎屑锆石总数量的 9%。

碎屑锆石 U-Pb 最小年龄或最年轻组分峰值年龄常可用于限制沉积地层时代^[17-18],为此笔者认为长7段开始沉积时代应该小于 239 Ma±。相比较而言,王多云给出长7段底部凝灰岩的年龄(240 Ma±)似乎偏老。然而,王多云等^[12]所测试的两个样品中,一个样品中包含有1颗锆石表面年龄为 229±3.2 Ma,另一样品中包含4颗锆石表面年龄为 230.4±2.7 Ma,两者在误差范围内一致,这5颗锆石年龄与邓秀琴等^[9]及笔者本次所测的凝灰岩在误差范围内一致,为此笔者认为该年龄才应真正代表长7段底部凝灰岩形成年龄。而王多云等^[12]给出的 240 Ma±年龄笔者认为可能代表了更早期一期的火山物质的形成年龄,依据有三,其一前人研究表明延长组长9段中亦普遍发育有凝灰岩夹层,说明存在更早期的火山事件;其二,笔者本次所测试的凝灰岩或砂岩样品中普遍存在 240 Ma±的岩浆锆石年龄,说明长7期沉积时有早期火山物质混入;其三,王多云所测两样品中均出现了约 230 Ma±的年龄,与其给出的 240 Ma±约有 10 Ma 之差,考虑到其采的是岩芯样品,周邻纹层状凝灰岩混染^[12]的可能性较小。综上所述,笔者认为延长组长7段底部凝灰岩形成时代在 230 Ma±较为合适。

同时,通过对前人和本次所测试的凝灰岩锆石 U-Pb 年龄图谱分析可以发现,长7段凝灰岩主体均以单峰值年龄谱图为主,偶夹杂少量其他年龄组分,与相邻层段砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄图谱存在明显的差异(图5)。从这方面来看,延长组长7段底部凝灰岩(火山物质)应以空降型沉积为主,较少有其他碎屑物质的混染。

5.2 凝灰岩物质来源及成因

长7段凝灰岩在区域上主要分布于盆地之西南,集中于定边—宁县—铜川一带,呈北西—南东向展布(图1),面积超过 3×10⁴ km²,由南西向北东厚度逐渐变薄^[8-9],元素地球化学分析表明其源岩以中酸性火山岩为主(图3)^[4-5]。尽管对盆地内凝灰岩的产状、展布及性质等已有了较明确的认识,但到目前为止,对凝灰岩的物质来源仍没有明确的论断。究其原因,其形成时代的不确定性是限制明确物质来源的重要因素之一。本次研究,认为长7段底部凝灰岩形成年龄在 230 Ma±,为晚三叠世早期卡尼阶(据 2015 年国际代表地层年),这为明确凝灰岩物质来源及成因提供了重要的依据。

综合调查显示,鄂尔多斯盆地腹地延长期有两处发育有火山或岩浆活动(图1),其一为盆地西北部贺兰山汝箕沟大岭—鼓鼓台的板内拉斑玄武岩,厚约 35 m,展布于上三叠统上田组(相当于延长组)顶部,并被中侏罗统汝箕沟组(相当于延安组)以微角度不整合覆盖,霍福臣等^[19]测得其全岩 K-Ar 同位素年龄为 229±15 Ma,刘池洋等^[14]依据该岩体的产状、接触关系、裂变径迹年龄及前人相关研究,综合认为该块状玄武岩主要形成于晚三叠世—早侏罗世;其二为盆地西南部灵台县龙门穹窿构造,有两口井钻遇岩体(龙1,龙2井),总体显示出碱性—偏碱性岩浆岩特点,以正长岩和二长岩为主,对其中的二长岩进行了锆石 U-Pb 定年^①,获得 1894±32 Ma、240.6±5.8 Ma 和 232.2±7.9 Ma 三组峰值年龄,分析认为后两组峰值年龄应代表了该岩体的结晶年龄。然上述岩浆活动在时代上虽与延长期凝灰岩形成时代相近,但其发育规模及岩浆岩性质却不相匹配,为此笔者认为它们不可能成为盆地火山物质的主要来源。

纵观全球剧烈的火山活动,一般与板块运动、地幔柱活动密切相关,往往发生在大规模俯冲、碰撞及其大陆裂解期间。区域构造环境分析表明,中晚三叠世期间,秦岭洋最终关闭,华北与扬子克拉通拼接,秦岭地区全面碰撞造山^[20];大致与此同时,其北侧华北克拉通大一统盆地开始出现东西分异,鄂尔多斯盆地发育^[14],为此造山—成盆两者时空关系密切(图1)。鄂尔多斯盆地延长期如此广布的凝灰岩,与盆地南部秦岭洋盆闭合,两大板块拼合碰撞在空间和区域背景均较吻合,那么是否是对该事件的响应?

近来,对秦岭造山带的研究认为,约在 246 Ma 勉略洋开始向南秦岭板块下俯冲,在 237 ~ 210 Ma 期间,随着俯冲加剧,洋壳消减,勉略洋逐渐萎缩,最终扬子板块与南秦岭板块碰撞,并发育巨量花岗岩体^[21];Deng *et al.*^[22]对光头山花岗岩套研究后,进一步指出勉略洋壳直到约 224 Ma 仍处于向南秦岭板块下俯冲,最终于 223 ~ 218 Ma 才发生闭合。笔者对秦岭地区 100 余个印支期花岗岩体形成年龄(均为锆石 U-Pb 年龄)的统计表明^[23],年龄介于 248 ~ 194 Ma,但主要集中在 ~ 225 Ma 以来(图6)。如依据上述阶段划分,~ 225 Ma 以来大量花岗岩体的出现,可能因碰撞导致地壳加厚,出现部分熔融,进而在南秦岭地区发育了大量花岗岩体。为此,笔者推测在 246

① 长庆油田分公司勘探开发研究院.鄂尔多斯盆地岩浆岩分布及其与油气聚集的关系.内部报告,2007.

~225 Ma 期间勉略洋正处于俯冲消减时期,而板块俯冲往往是火山活动的重要原因,推测该时期在勉略洋周邻应广泛出现火山活动。这在时空上与鄂尔多斯盆地延长期广泛发育的凝灰岩具有较好的耦合性。

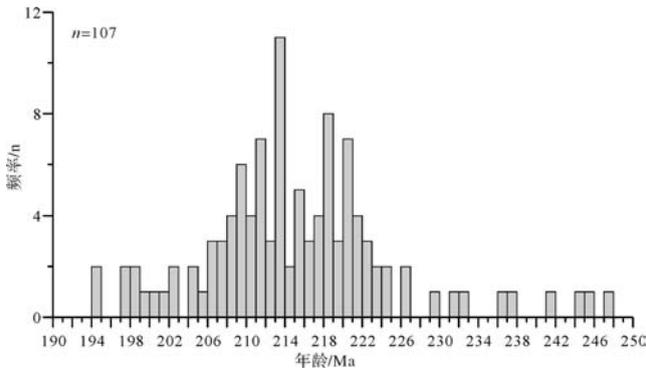


图6 秦岭造山带印支期花岗岩体锆石 U-Pb 年龄统计频率分布图

Fig.6 Frequency histogram of the zircon U-Pb ages of Indosinian granites in Qinling orogenic belt

此外,依据 $Rb/Y+Nb$ 判别图解^[24],铜川地区凝灰岩夹层的物质来源与火山岛弧存在密切联系(图7);盆地其他地区延长组凝灰岩样品分析结果也得出了类似的结论^[5,11],这与盆地南部勉略洋俯冲环境亦相一致。中晚三叠纪古环境恢复表明,该时期盛行的古季风主要为南西至北东方向^[25],这也能较好的解释火山物质在邻近的鄂尔多斯盆地广泛发育且长7₃层凝灰岩表现出西南厚北东薄的展布特点。同时,张辉^[13]通过对凝灰岩锆石微量元素及 Lu-Hf 分析,认为盆地内延长组凝灰岩与南秦岭花岗岩具有相似的母质来源,主要来自地壳岩石的部分熔融,并且有一定的地幔物质加入,进而指出延长期盆地内凝灰岩的火山物质来自勉略缝合带。

综上所述,笔者认为延长期凝灰岩的火山物质主要来自秦岭造山带,为中晚三叠世勉略洋闭合过程中的产物。但遗憾的是,到目前为止在秦岭地区尚未报道有同期的火山岩的广泛分布,该工作还有待进一步深入研究,推测大量火山岩可能在秦岭后期内陆造山过程中剥蚀殆尽。

5.3 地质意义

5.3.1 延长组发育时期

沉积地层中保存的凝灰岩层往往经历了火山喷发、搬运(风携或水载)及沉积过程,这一过程在地质时间尺度上可认为是近乎瞬时的^[3],因而其绝对年龄的测定,可间接厘定沉积地层的时代。本文综合得

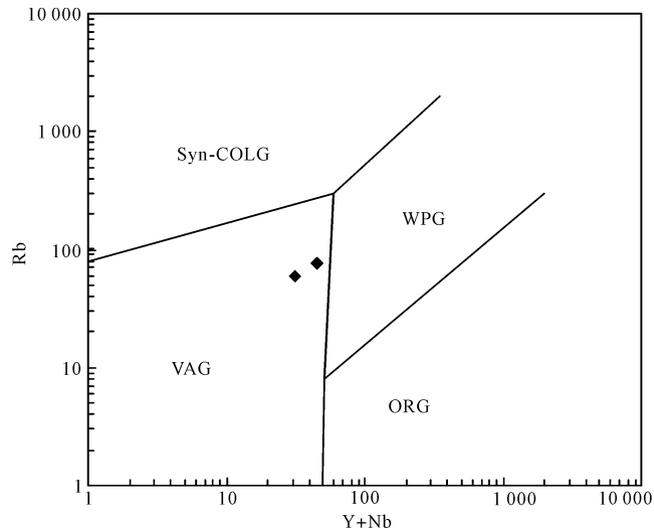


图7 研究区凝灰岩大地构造环境判别图解

底图据 Pearce *et al.*^[24],VAG.火山弧花岗岩,Syn-COLG.同碰撞花岗岩,WPG.板内花岗岩,ORG.洋脊花岗岩

Fig.7 Discrimination diagrams of tuff for tectonic settings in the study area

出延长组长7段底部凝灰岩的形成时代在 $230 \text{ Ma} \pm$,该年龄可代表长7段开始沉积的时间,对应于晚三叠世早期卡尼阶。

长7段之前延长组还沉积有长10段—长8段的沉积地层,期间为连续沉积,沉积厚度可达 $350 \sim 550 \text{ m}$,以河流、三角洲相及滨湖相沉积为主。依据地层厚度、沉积速率等推测延长组底界年龄约为 $237 \text{ Ma} \pm$ ^[9],笔者认为较为合理。该年龄若依据2015年国际年代地层表则刚好处于中晚三叠世界线,为此延长组是否具穿时性(跨中晚三叠世)^[12]笔者认为还有待进一步论证。

5.3.2 盆—山响应关系

本文进一步探讨了延长组凝灰岩的物质来源及其成因,指出延长组中凝灰岩夹层主要来自盆地南部秦岭造山带,其成因与勉略洋壳向南秦岭板块下俯冲所形成的岛弧火山等联系密切,该认识进一步增强了鄂尔多斯盆地与秦岭造山带形成演化之间的时空联系。依据上述秦岭造山带形成过程^[21-22]及延长期湖盆演化阶段^[23],笔者将两者之间的响应关系大致划分为三个阶段:1) $237 \sim 230 \text{ Ma} \pm$,秦岭地区处于勉略洋壳向北俯冲的早中期,鄂尔多斯盆地为湖盆形成和扩展时期(长10—长8期)。其中长10—长9期盆地西南地区以辫状河、辫状河三角洲及滨浅湖沉积为主,地形相对较宽缓平坦^[26-27],长8期以浅水湖泊三角洲沉积为主,古地形十分平缓,坡降不足 2 m/km ,

不具有明显的“南陡北缓”的古地貌特征^[28],可见上述时期盆地沉积—构造较为平稳,该时期勉略洋壳俯冲对盆地没有产生明显的影响,仅在长 9₁段湖泊相地层中发育有凝灰岩;2) 230~225 Ma±,大致对应勉略洋俯冲晚期,由俯冲向碰撞转换。从长 8 末期至长 7 期,盆地构造格局、沉积环境开始发生重大变化,盆地西南部陡坡地形出现,强烈拗陷,发育冲积扇、扇三角洲沉积体系,湖盆面积和水体达到鼎盛,半深湖—深湖区范围可达 10×10⁴ km²以上,沉积中心向西南迁移了几十公里^[9,14],盆地南部还开始有来自秦岭造山带新物源的加入^[29]。此外,除凝灰岩广泛发育外,盆地南部开始大量发育浊积岩、震积岩及同沉积构造变形^[30]。同时地质与地球物理资料分析表明,延长组长 7 期盆地表现出张性环境及较高热背景^[31]。上述诸多现象,共同表明了该时期勉略洋壳向北的俯冲导致了鄂尔多斯盆地南部深、浅部产生了强烈响应;3) 225~200 Ma±,洋盆最终闭合,扬子板块与华北板块发生碰撞,地壳加厚,秦岭地区发育巨量花岗岩体。盆地构造环境转变为挤压背景,湖盆开始萎缩(长 6—长 4+5 期),沉积沉降中心向北东迁移,最终逐渐走向消亡(长 3—长 1 期),并出现差异抬升剥蚀。

6 结论

(1) 岩石薄片、扫描电镜及主微量元素等分析,表明铜川何家坊剖面延长组长 7₃层凝灰岩蚀变强烈,黏土矿物发育,具中酸性火山岩特点;锆石 U-Pb 定年获得两凝灰岩样品主组分加权平均年龄分别是 226.5±1.6 Ma(*n*=24)和 229.7±2.2 Ma(*n*=21)。

(2) 依据长 7₃层同期砂岩碎屑锆石最年轻组分 235~243 Ma(*n*=7,加权平均年龄 239.3 Ma),结合本次凝灰岩测试结果及前人成果,综合认为延长组长 7 段开始发育时间为 230 Ma±,该年龄不但代表了延长期湖盆进入鼎盛发育的时期,同时也指示了盆地拗陷型富烃凹陷的发育时间。

(3) 长 7 期底部凝灰岩的火山物质主要来自秦岭造山带,可能与勉略洋壳向南秦岭板块下俯冲所形成的岛弧火山存在联系。以该凝灰岩形成时代为线索,依据秦岭造山带形成过程及延长期湖盆演化阶段,将两者的耦合响应过程划分成为 3 个阶段,该认识对探讨鄂尔多斯盆地发育演化过程及长 7 期湖盆属性具有重要的指示意义。

致谢 此次工作和成文过程中与邱欣卫博士的多次讨论使作者受益匪浅,在此致以最诚挚的感谢。

参考文献 (Reference)

- [1] 钟蓉,孙善平,傅泽明. 山东及邻区晚石炭世—早二叠世火山事件沉积及地层对比[J]. 地质学报, 1996, 70(2): 142-152. [Zhong Rong, Sun Shanping, Fu Zeming. Volcanic event deposits and stratigraphic correlation of the late Carboniferous-early Permian in Shandong and adjacent regions[J]. Acta Geologica Sinica, 1996, 70(2): 142-152.]
- [2] Desmastes D, Grosheny D, Beaudoin B, et al. High resolution stratigraphic record constrained by volcanic ash beds at the Cenomanian—Turonian boundary in the Western Interior Basin, USA[J]. Cretaceous Research, 2007, 28(4): 561-582.
- [3] Lowe D J. Tephrochronology and its application: a review[J]. Quaternary Geochronology, 2011, 6(2): 107-153.
- [4] 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. [Zhang Wenzheng, Yang Hua, Peng Ping'an, et al. The influence of Late Triassic volcanism on the development of Chang 7 high grade hydrocarbon source rock in Ordos Basin[J]. Geochimica, 2009, 38(6): 573-582.]
- [5] 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, 36(1): 139-150. [Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Mao Guangzhou, et al. Petrological-geochemical characteristics of volcanic ash sediments in Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Earth Science, 2011, 36(1): 139-150.]
- [6] 刘池洋,赵俊峰,马艳萍,等. 富烃凹陷特征及其形成研究现状与问题[J]. 地学前缘, 2014, 21(1): 75-88. [Liu Chiyang, Zhao Junfeng, Ma Yanping, et al. The advances and problems in the study of the characteristics and formation of hydrocarbon-rich sag[J]. Earth Science Frontiers, 2014, 21(1): 75-88.]
- [7] 左智峰,戚颖,葛小瑞,等. 鄂尔多斯盆地晚三叠世火山物质对油气成藏条件的影响[J]. 兰州大学学报:自然科学版, 2008, 44(3): 12-15. [Zuo Zhifeng, Qi Ying, Ge Xiaorui, et al. Effect of late Triassic volcanic sediment event on hydrocarbon accumulation conditions in Ordos Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2008, 44(3): 12-15.]
- [8] 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. [Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Li Yuanhao, et al. Distribution characteristics and geological significances of tuff interlayers in Yanchang Formation of Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(6): 1138-1146.]
- [9] 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. [Deng Xiuqin, Luo Anxiang, Zhang Zhongyi, et al. Geochronological comparison on Indosinian tectonic events between Qinling orogeny and Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(6): 939-953.]
- [10] 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.]
- [11] Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Mao Guangzhou, 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.
- [12] 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(D辑): 地球科学, 2014, 44(10): 2160-2171. [Wang Duoyun, Xin Bushe, Yang Hua, et al. Zircon SHRIMP U-Pb age and geological implications of tuff at the bottom of Chang-7 Member of Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Science China(Seri.D): Earth Sciences, 2014, 44(10): 2160-2171.]
- [13] 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): 565-575. [Zhang Hui, Peng Ping'an, Zhang Wenzheng. Zircon U-Pb ages and Hf isotope characterization and their geological significance of Chang 7 tuff of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2): 565-575.]
- [14] 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, 80(5): 617-638. [Liu Chiyang, Zhao Hongge, Gui Xiaojun, et al. Space-time coordinate of the evolution and reformation and mineralization response in Ordos Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(5): 617-638.]
- [15] McLennan S M. Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes[M]//Lipin B R, McKay G A. Geochemistry and Mineralogy of Rare Earth Elements: Review in Mineralogy. Mineralogical Society of America, 1989, 21: 169-200.
- [16] Hoskin P W O, Schaltegger U. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 2003, 53(1): 27-62.
- [17] Brown E H, Gehrels G E. Detrital zircon constraints on terrane ages and affinities and timing of orogenic events in the San Juan Islands and North Cascades, Washington[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 2007, 44(10): 1375-1396.
- [18] Dickinson W R, Gehrels G E. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: a test against a Colorado Plateau Mesozoic database[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 288(1/2): 115-125.
- [19] 宁夏回族自治区地质矿产局. 宁夏回族自治区区域地质志. 北京:地质出版社, 1990: 145-158, 331. [Ningxia Geological Bureau. Regional geology of Ningxia Hui Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990: 145-158, 331.]
- [20] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京:科学出版社, 2001. [Zhang Guowei, Zhang Bengren, Yuan Xuecheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001.]
- [21] Dong Yunpeng, Zhang Xiaoning, Liu Xiaoming, et al. Propagation tectonics and multiple accretionary processes of the Qinling Orogen [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 104: 84-98.
- [22] Deng Zhengbin, Liu Shuwen, Zhang Wanyi, et al. Petrogenesis of the Guangtoushan granitoid suite, central China: Implications for Early Mesozoic geodynamic evolution of the Qinling Orogenic Belt [J]. Gondwana Research, 2016, 30: 112-131.
- [23] 王建强. 鄂尔多斯盆地南部中新世演化—改造及盆山耦合关系[D]. 西安:西北大学, 2010. [Wang Jianqiang. Mesozoic-Cenozoic basin evolution-reforming and basin-mountain coupling in southern Ordos Basin[D]. Xi'an: Northwest University, 2010.]
- [24] Pearce J A, Harris N B W, Tindle A G. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks[J]. Journal of Petrology, 1984, 25(4): 956-983.
- [25] Carroll A R, Graham S A, Smith M E. Walled sedimentary basins of China[J]. Basin Research, 2010, 22(1): 17-32.
- [26] 付金华, 李士祥, 刘显阳, 等. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组长9油层组沉积相及其演化[J]. 古地理学报, 2012, 14(3): 269-284. [Fu Jinhua, Li Shixiang, Liu Xianyang, et al. Sedimentary facies and its evolution of the Chang 9 interval of the upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2012, 14(3): 269-284.]
- [27] 完颜容, 李相博, 刘化清, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长10期沉积环境与沉积体系[J]. 沉积学报, 2011, 29(6): 1105-1114. [Wanyan Rong, Li Xiangbo, Liu Huaqing, et al. Depositional environment and sedimentary system of Chang 10 stage Yanchang Formation in the Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1105-1114.]
- [28] 刘化清, 李相博, 完颜容, 等. 鄂尔多斯盆地长8油层组古地理环境与沉积特征[J]. 沉积学报, 2011, 29(6): 1086-1095. [Liu Huaqing, Li Xiangbo, Wanyan Rong, et al. Palaeogeographic and sedimentological characteristics of the Triassic Chang 8, Ordos Basin, China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(6): 1086-1095.]
- [29] 王建强, 刘池洋, 郭真, 等. 鄂尔多斯盆地中南部晚三叠世延长期区域构造环境转变的沉积响应[J]. 地学前缘, 2015, 22(3): 194-204. [Wang Jianqiang, Liu Chiyang, Guo Zhen, et al. Sedimentary response of regional tectonic transformation in Late Triassic Yanchang period at the central and southern Ordos Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(3): 194-204.]
- [30] 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. [Qiu Xinwei, Liu Chiyang, Wang Jianqiang, et al. Triggers and characteristics of Late Triassic deep-lacustrine synsedimentary deformation structures in Ordos Basin[J]. Chinese Journal of Geology, 2013, 48(1): 204-216.]
- [31] Liu Chiyang, Wang Jianqiang, Deng Yu. The characteristics and formation dynamic environment of Backland basin-an analysis in Yanchang period hydrocarbon-rich sag in Ordos Basin [C]//Abstract Volume of International Conference on Continental Dynam-

Geochronology, Potential Source and Regional Implications of Tuff Intervals in Chang-7 Member of Yanchang Formation, South of Ordos Basin

WANG JianQiang^{1,2}, LIU ChiYang^{1,2}, LI Hang^{1,2}, WU TongTong^{1,2}, WU JingLi^{1,2}

1.Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

2.State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: Tuff intervals of Yangchang Formation are widespread in the south of Ordos basin, most of them are well documented at the bottom of Chang 7 segment. The geochronology and volcanic matters of tuff intervals have great significance on the formation of high quality source rock, the development time of hydrocarbon-rich sag and the occurrence of synchronous tectonic-magmatic events. This paper focuses on the tuff intervals, which are located at the bottom of Chang 7 segment in Hejiafang outcrop section, southern Ordos basin. Firstly, thin sections, scanning electron microscopy (SEM) and major and trace elements analysis methods were used to identify the petrographic and geochemical characteristics of the tuff. Then, zircon U-Pb dating method was used to study the geochronology of the tuff intervals as well as the sandstone at the same segment. The results indicate that the tuff has the characteristics of intermediate-acidic volcanic rocks with strong alteration. The weighted average ages of the dominant component in the two tuff samples are 226.5 ± 1.6 Ma ($n = 24$) and 229.7 ± 2.2 Ma ($n = 21$), respectively, while the youngest group ages of detrital zircons range from 235 ~ 243 Ma ($n = 7$, the weighted average age is 239.3 Ma). Combined with previous study results, it is concluded that the age of tuff intervals at the bottom of chang7 segment is around 230 Ma \pm , which can represent the peak period of Ordos basin's evolution and the beginning development of hydrocarbon-rich sag in Yanchang Formation. According to the characteristics of tuff intervals, the syntectonic events of Ordos Basin and Qinling Orogenic belt over this period, it can be deduced that the volcanic matters of tuff intervals mainly derived from the Qinling area, related closely to the volcanic arc belt caused by the subduction of Mianlue oceanic crust to the south Qinling plate. The coupling process between the Qinling orogenic belt and the southern Ordos basin can be divided into three periods. The results have important indications to re-recognize the evolution of the Ordos Basin and the basin property at Chang 7 period.

Key words: Ordos Basin; Yanchang Formation; tuff; U-Pb zircon dating; Qinling orogenic belt