

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

杨甫¹⁾, 陈刚¹⁾, 陈强²⁾, 丁超³⁾, 高磊¹⁾, 雷盼盼¹⁾, 张文龙¹⁾, 师晓林¹⁾, 童明军⁴⁾

1) 西北大学大陆动力学国家重点实验室/地质学系, 西安, 710069;

2) 长安大学 地球科学与资源学院, 西安, 710054; 3) 西安石油大学地球科学与工程学院, 西安, 710065;

4) 陕西延长石油国际勘探开发工程有限公司, 西安, 710075

内容提要: 运用碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学分析方法, 探讨分析了鄂尔多斯地块西南缘奥陶系平凉组沉积期的物源环境。结果表明: ①平凉组凝灰质砂岩中的碎屑锆石 U-Pb 年龄大致包含 3 组: 第一组为早古生代的 407 ~ 477Ma, 峰值为 454Ma, 占总体的 72.5%; 第二组为中—新元古代的 588 ~ 1548Ma, 峰值为 962Ma, 占总体的 22.5%; 第三组为古元古代的 1612 ~ 2496Ma, 占总体的 5%。②集中在 407 ~ 477Ma 年龄组分指示其物源主要来自于祁连—北秦岭岛弧杂岩带, 588 ~ 1548Ma 和 1612 ~ 2496Ma 的年龄组分反映的物源主要来自于北秦岭造山带, 祁连造山带和华北板块基底。③锆石年龄谱综合分析, 平凉组碎屑沉积物质来源复杂, 具有明显的多源性, 指示晚奥陶世平凉期的沉积环境应属于祁连—北秦岭岛弧杂岩带与鄂尔多斯地块西南缘之间的局限残留边缘海盆地。

关键词: 上奥陶统平凉组; 锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年; 物源分析; 鄂尔多斯盆地

锆石是最为稳定的矿物之一, 抗风化能力强, 受沉积分选过程影响小, 其 U—Th—Pb 同位素体系封闭温度高, 受后期构造热事件影响较小。通过沉积岩中碎屑锆石微区原位测定的年龄分布特征来确定碎屑沉积岩物质来源 (Geslin et al., 1999; Cawood et al., 2000; 胡波等, 2009)、未受到后期热液活动或变质事件影响的岩浆锆石最小年龄来限定沉积岩地层的最大沉积年龄 (Rainbird et al., 2001; Surpless et al., 2006; Dickinson et al., 2009) 和重建造山带与盆地构造演化 (Yang Jinhui et al., 2006; Balintoni et al., 2009) 以及确定沉积盆地基底性质等 (李亚萍等, 2007)。此外, 碎屑锆石的年龄结构并不受沉积循环分馏过程的影响, 碎屑锆石中即使存在沉积锆石再循环, 这些再循环锆石的年龄特征也与区域构造—岩浆事件相对应 (Morton et al., 1996)。沉积岩中的碎屑矿物 (如锆石, 石榴子石, 磷灰石和白云母) 都曾被用于识别华北克拉通、扬子陆块、大别造山带和南—北秦岭造山带沉积物源区和古老大陆边缘的演化历史 (Sun Weihua et al., 2009; 胡波等,

2009; Wang Lijuan et al., 2010; Dong Yunpeng et al., 2011, 2013)。本次针对盆地南部地区平凉组沉积期的区域构造环境和沉积碎屑岩的物质来源问题, 选择盆地南部岐山交界平凉组中的凝灰质砂岩样品为研究对象, 进行了锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨鄂尔多斯西南缘上奥陶统平凉组的沉积物源, 为晚奥陶世构造古地理和盆山关系研究提供新的资料。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地处于华北克拉通的中西部, 地跨陕、甘、宁、蒙、晋五省区, 周邻被渭河 (关中)、银川、河套等地堑盆地所镶嵌, 外围被秦岭、六盘山、贺兰山、大青山及吕梁山所环绕, 盆地所在地区, 在地史上大范围接受沉积的时间长达 0.4 ~ 0.5Ga, 总体构成了不同时期多个大型盆地的叠加、复合, 为多重叠合型盆地 (刘池洋等, 2006)。鄂尔多斯南部地区早古生代时位于鄂尔多斯地台与古秦岭洋之间, 是呈过渡式接触状态的沉积—构造枢纽地带 (袁卫国等, 1996)。寒武纪—早奥陶世具有被动大陆边缘

注: 文为西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项经费 (编号 BJ14252)、国家自然科学基金 (编号 41172101)、中国地质调查局油气资源项目 (编号 1212011220761) 和国家基础科学人才培养基金 (编号 XDCX2014-18) 资助的成果。

收稿日期: 2014-04-01; 改回日期: 2014-10-30; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 杨甫, 男, 1986 年生。博士研究生。主要从事矿产普查与勘探研究。Email: yangpu666@163.com。通讯作者: 陈刚, 男, 1965 年生。教授, 博士生导师。主要从事含油气盆地研究。Email: Chengang@nwu.edu.cn。

的演化特征,中奥陶世,由于古秦岭洋壳向华北板块俯冲消减,自商南—丹凤断裂带北侧陆缘裂陷槽发展为弧后扩张海盆,向北形成沟、弧、盆体系发育的古活动大陆边缘,随后由于秦岭古洋壳的强烈俯冲作用,导致鄂尔多斯地块和华北地块东部大面积抬升为陆,晚奥陶世为弧后盆地发育时期(周鼎武等,1994;钱锋等,2002)。志留纪—早泥盆世,洋壳板片大规模俯冲,商丹洋盆闭合,北秦造山带增生于华北陆块南缘(周鼎武等,1994;Dong Yunpeng et al., 2011,2013)。

鄂尔多斯南部岐山地区早奥陶世冶里—亮甲山期是一套以泥质白云岩和白云岩为主的沉积组合,属于潮坪相沉积。中奥陶世马家沟期沉积了纹层状含泥质白云岩,仍为潮坪相环境,随着水体加深至台地相,为一套厚层灰岩。之后水体继续加深,灰岩厚度变薄,并出现了深水环境的鹦鹉螺化石,其上沉积了纹层状灰岩及厚层的砾屑灰岩,为深水斜坡相沉积,并发育碳酸盐岩的重力流沉积(后期被白云岩化)。晚奥陶世平凉期开始海退,岩性以黄绿、灰绿色薄层泥岩和深灰、灰色泥灰岩夹凝灰岩和砂岩为主的一套深水斜坡相沉积,底部以粉砂岩和细砂岩

的出现与下伏马家沟组中厚层碳酸盐岩分界。背锅山期继续海退,沉积特征表明其处于斜坡环境。晚期海水退出,结束早古生代沉积(陈强等,2009)。现今的鄂尔多斯盆地西南缘岐山地区出露的下古生界奥陶纪地层较为齐全(图 1),为本次研究所需样品提供了良好的采样场所。

2 样品与分析方法

分选锆石的样品采自鄂尔多斯盆地西南缘的岐山—麟游交界南 2 km(坐标: N34°34'39.2"; E107°45'38.5")的上奥陶统平凉组(O_{3p})黄绿色泥页岩夹砂岩段上部,样品岩性为灰色致密凝灰质细砂岩(>2kg),编号为 JS-1。

实验室采用常规重液和电磁分选并结合双目镜下手工挑选的方法获取纯净锆石颗粒,在挑选时要求不区分粒度、颜色和自形程度,尽可能地全部或绝大部分挑出以避免人为筛选。锆石样品制靶和锆石特征(反射光、透射光和阴极发光)观察以及单颗粒锆石的 LA-ICP-MS 测试分析均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

采用 FEI 公司 XL30 型 SFEG 电子束进行锆石

内部结构显微照相分析,以获取锆石的结晶形态及内部结构信息,用以选取合适的区域进行锆石 U-Pb 年代学和微量元素分析。测试点的选取首先要对锆石的反射光和阴极发光(CL)图像反复对比,测试时选用具有典型岩浆结晶成因的锆石颗粒,测试点要避开包裹体、裂隙以及核—幔一边交界的位置,以保证年龄结果的准确性。在测试样品之前为了除去样品表面污染,应先采用体积百分比为 3% 的 HNO₃ 进行清洗。

采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a。激光剥蚀系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M,

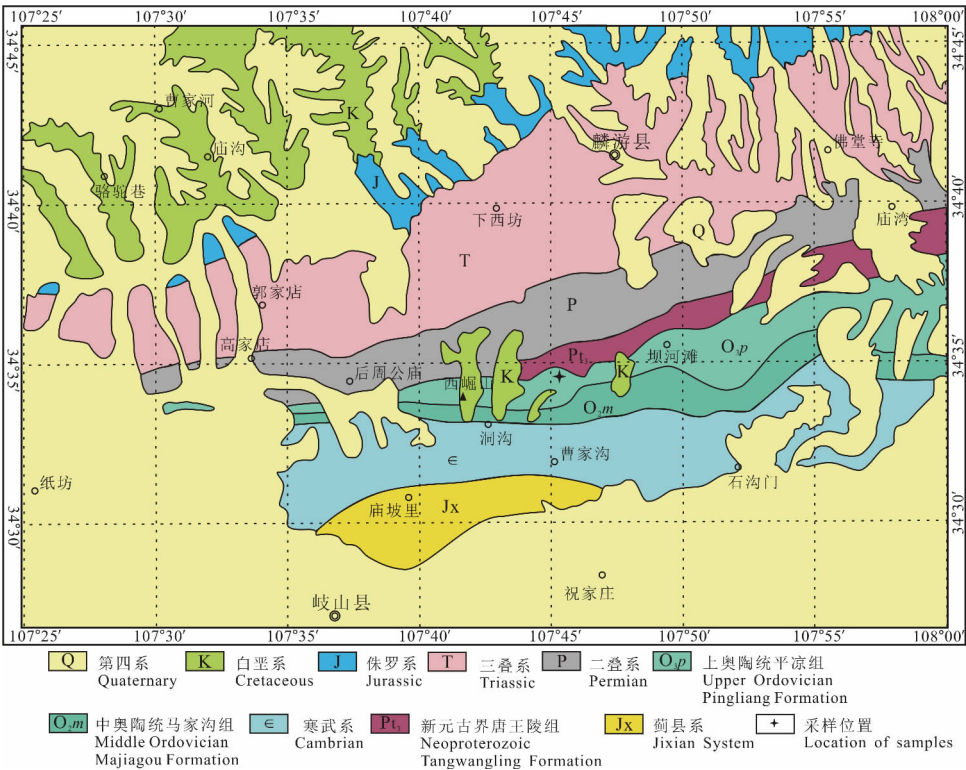


图 1 鄂尔多斯盆地西南缘岐山地区地质简图及采样位置
Fig. 1 Simplified geological map and sample localities in the Qishan area
on the southwestern margin of the Qrdos Basin

与 MicroLas 公司的光学系统和四级杆等离子体质谱(Q-ICPMS)联用的方法,将激光剥蚀产生的气溶胶按照 1: 3 的分配系数导入至 Q-ICPMS,分别进行锆石 U-Pb 定年和微量元素含量分析。实验中采样方式为单点剥蚀,采用 He 作为剥蚀物质的载气,锆石 U-Pb 年龄测定采用国际标准锆石 91500 作为外标校正方法,元素含量测定采用 NIST610 作为外标。分析所用激光斑束直径为 30 μm ,频率为 10Hz,每个样品点的气体背景采集时间是 30s,信号采集时间为 40s。

单颗粒锆石 U-Pb 原位测试分析数据处理采用 GLITTER(ver4.0 Macquarie University)程序。选取谐和度在 90% ~ 110% 的数据用于作图和结果讨论,若 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $\geq 1.0\text{Ga}$,谐和度定义为 $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})/(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄}) \times 100\%$,并以 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄作为锆石表面年龄;若 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄 $< 1.0\text{Ga}$,谐和度定义为 $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})/(^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \text{ 年龄}) \times 100\%$,并以 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄作为锆石表面年龄。采用软件 Isoplot(ver3.0)绘制锆石 U-Pb 年龄谐和图、频率分布直方图。

3 分析结果

3.1 锆石测年结果

(1) 锆石特征:本次测试的锆石总体具有如下特征(图 2):① 锆石颗粒分两种:主要为黄粉色,半自形柱状及短柱状,圆粒状较少,表面较光滑,有裂纹,晶内有黑色包体,该类锆石磨圆度较低,分选性好,搬运痕迹不太明显,表明该类锆石离物源区较近,约占锆石总量的 80%;少数玫瑰色,次滚圆状颗粒为主,半自形柱状较少,表面从较光滑—较粗糙呈过渡状,该类锆石磨圆度较高,分选性好,搬运痕迹略显,表明该类锆石略经搬运而来,约占锆石总数的 20%。② 锆石的 CL 发光程度不均一:部分锆石发光较差,当电压增大时,才可以看清楚锆石内部的环带结构,这类锆石的 Th、U 含量较高是导致发光性差的主要原因。③ 具有复杂的成因构造:绝大部分锆石具有明显的振荡环带,表明其原始成因类型主要为岩浆锆石,少数锆石具有核—幔—边结构,显示窄的变质增生亮边,可能受到后期热液或变质事件影响。

(2) 锆石 Th、U 含量及 Th/U 比值:已有研究表明,通过锆石 Th/U 比值可以有效判断锆石起源(Belousova et al., 2002),岩浆锆石具有较高的 Th/U 比值(> 0.4),而变质锆石具有较低的 Th/U 比值

(< 0.1)(Corfu et al., 2003)。本次测试分析的所有锆石样品点的 Th、U 含量及 Th/U 比值变化范围(表 1)较大,分别为 4.36 ~ 880.46 $\mu\text{g/g}$ 和 53.99 ~ 565.48 $\mu\text{g/g}$,Th/U 比值为 0.02 ~ 2.23(图 3),其中 Th/U 比值大于 0.4 的占 93.7%,仅有 1 颗锆石的 Th/U 比值小于 0.1(JS-1-03),应为变质成因锆石颗粒。



图 2 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组碎屑锆石 CL 图像

Fig. 2 CL images of the detrital zircon from the Upper Ordovician Pingliang Fm. on the southwestern margin of the Qrdos Basin

(3) 锆石年龄特征:挑选其中晶型较好的 85 颗锆石进行了锆石 U-Pb 等离子质谱(LA-ICP-MS)分析,获得了满足谐和度要求的 80 颗锆石 U-Pb 谐和年龄数据(表 1,谐和度为 90% ~ 110%)。单颗粒锆石 U-Pb 测年数据的分布范围为 407 ~ 2496Ma ($n = 80$),可分为 3 组,第一组为早古生代的 407 ~

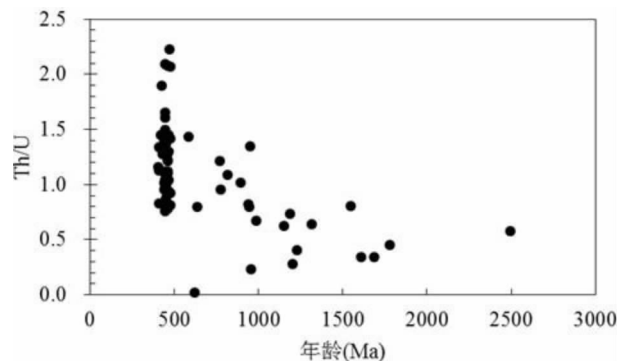


图 3 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组碎屑锆石年龄与 Th/U 关系

Fig. 3 Diagram show relationship between Th/U ratios and U-Pb age of the detrital zircon from the Upper Ordovician Pingliang Fm. on the southwestern margin of the Ordos Basin

表 1 鄂尔多斯盆地西南缘平凉组砂岩中的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年结果

Tabel 1 LA-ICP-MS U-Pb dating result of the detrital zircon from sandstone of the Upper Ordovician

Pingliang Formation on the southwest margin of the Ordos Basin

测点	元素含量(×10 ⁻⁶)及比值				同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb*	Th	U	Th/U	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
01	24.2	42.9	107.2	0.4	0.2085	0.0046	2.3424	0.0720	0.0814	0.0031	1221	24	1225	22	1230	29
02	17.9	214.2	177.0	1.2	0.0744	0.0020	0.6052	0.0410	0.0589	0.0043	463	12	480	26	563	102
03	27.1	4.4	285.7	0.0	0.1014	0.0022	0.8427	0.0259	0.0602	0.0023	623	13	621	14	610	33
04	11.9	129.0	124.3	1.0	0.0748	0.0017	0.5717	0.0288	0.0553	0.0031	465	10	459	19	426	71
05	14.9	108.1	135.7	0.8	0.1036	0.0029	0.8801	0.0647	0.0615	0.0048	636	17	641	35	657	109
06	9.4	71.1	85.8	0.8	0.0654	0.0026	0.5359	0.0696	0.0593	0.0080	409	16	436	46	578	216
07	61.4	62.4	183.6	0.3	0.3032	0.0064	4.1593	0.1021	0.0993	0.0033	1707	32	1666	20	1612	20
08	43.7	595.7	287.9	2.1	0.0769	0.0026	0.6438	0.0652	0.0606	0.0064	477	15	505	40	626	162
09	14.9	184.1	143.7	1.3	0.0746	0.0017	0.5752	0.0269	0.0558	0.0029	464	10	461	17	446	63
10	12.8	147.5	132.0	1.1	0.0741	0.0018	0.5777	0.0307	0.0565	0.0033	461	11	463	20	472	76
11	51.9	192.4	234.4	0.8	0.1643	0.0047	2.4010	0.1354	0.1059	0.0065	939	28	942	81	952	294
13	131.3	155.9	565.5	0.3	0.2025	0.0042	2.3405	0.0580	0.0837	0.0028	1183	23	1190	23	1202	78
14	19.6	240.8	166.4	1.4	0.0754	0.0046	0.5860	0.1321	0.0563	0.0130	469	28	468	85	463	372
15	19.5	114.7	94.7	1.2	0.1344	0.0031	2.0659	0.0695	0.1114	0.0045	773	19	828	57	980	220
16	14.3	189.4	149.0	1.3	0.0693	0.0018	0.5235	0.0340	0.0547	0.0038	432	11	428	23	400	100
17	9.5	92.1	96.7	1.0	0.0711	0.0020	0.5591	0.0456	0.0570	0.0049	443	12	451	30	490	130
18	10.4	101.7	110.2	0.9	0.0767	0.0020	0.5943	0.0398	0.0561	0.0040	477	12	474	25	456	103
20	60.3	141.0	175.1	0.8	0.2774	0.0059	3.6767	0.0932	0.0960	0.0032	1578	30	1566	20	1548	21
21	38.8	199.3	197.3	1.0	0.1490	0.0032	1.4690	0.0462	0.0714	0.0028	895	18	918	19	970	32
22	8.6	75.5	96.7	0.8	0.0745	0.0020	0.5839	0.0403	0.0568	0.0042	463	12	467	26	485	106
23	26.6	286.5	254.8	1.1	0.0660	0.0018	0.5048	0.0397	0.0554	0.0046	412	11	415	27	429	126
24	11.6	147.4	107.7	1.4	0.0726	0.0021	0.5620	0.0468	0.0561	0.0049	452	13	453	30	454	134
25	168.3	161.0	477.8	0.3	0.3059	0.0063	4.3661	0.0955	0.1034	0.0032	1720	31	1706	18	1687	18
26	73.5	830.2	401.0	2.1	0.0741	0.0025	0.6348	0.0664	0.0621	0.0068	461	15	499	41	677	166
27	19.0	190.5	203.7	0.9	0.0754	0.0020	0.5997	0.0391	0.0576	0.0040	469	12	477	25	516	98
28	17.0	137.7	96.2	1.4	0.0954	0.0032	0.8255	0.0834	0.0627	0.0066	588	19	611	46	697	158
29	144.2	141.8	247.4	0.6	0.4615	0.0095	10.4357	0.2265	0.1639	0.0051	2446	42	2474	20	2496	16
30	24.4	256.0	197.2	1.3	0.0715	0.0018	0.5461	0.0364	0.0553	0.0040	445	11	442	24	425	103
31	32.1	463.6	208.3	2.2	0.0758	0.0031	0.6273	0.0850	0.0600	0.0084	471	19	494	53	604	226
32	89.9	119.6	525.8	0.2	0.1598	0.0033	1.5784	0.0377	0.0716	0.0024	955	18	962	15	975	22
33	11.4	123.5	119.3	1.0	0.0721	0.0017	0.5656	0.0304	0.0569	0.0034	449	10	455	20	486	77
34	88.3	358.4	453.2	0.8	0.1578	0.0033	1.5646	0.0402	0.0719	0.0025	945	18	956	16	982	24
35	25.3	155.9	116.0	1.3	0.1586	0.0035	1.6067	0.0579	0.0734	0.0031	949	20	973	23	1026	39
36	11.0	127.6	104.4	1.2	0.0739	0.0018	0.5794	0.0362	0.0568	0.0038	460	11	464	23	485	94
38	9.7	87.2	107.9	0.8	0.0725	0.0019	0.5587	0.0372	0.0559	0.0040	451	11	451	24	448	102
40	20.4	273.4	193.4	1.4	0.0766	0.0021	0.6215	0.0480	0.0589	0.0048	475	13	491	30	562	120
41	26.6	391.4	243.9	1.6	0.0716	0.0029	0.5995	0.0802	0.0607	0.0084	446	18	477	51	629	221
42	12.3	124.0	122.4	1.0	0.0738	0.0020	0.5643	0.0414	0.0555	0.0043	459	12	454	27	432	116
43	76.4	880.5	421.0	2.1	0.0719	0.0021	0.5713	0.0473	0.0576	0.0050	448	12	459	31	514	132
44	14.3	144.8	142.4	1.0	0.0714	0.0018	0.6310	0.0349	0.0641	0.0039	441	11	446	38	476	248
45	22.5	319.5	213.8	1.5	0.0720	0.0016	0.5603	0.0236	0.0564	0.0027	448	10	452	15	469	55
46	18.3	209.9	162.2	1.3	0.0752	0.0017	0.5939	0.0269	0.0573	0.0029	468	10	473	17	501	61
47	15.1	161.2	146.7	1.1	0.0740	0.0017	0.5844	0.0255	0.0573	0.0029	460	10	467	16	503	57
48	47.7	125.0	201.1	0.6	0.1982	0.0042	2.1355	0.0594	0.0781	0.0028	1166	22	1160	19	1150	26
49	14.6	153.1	146.9	1.0	0.0730	0.0017	0.5660	0.0273	0.0562	0.0030	454	10	455	18	461	67
50	7.9	67.2	85.3	0.8	0.0739	0.0018	0.5779	0.0335	0.0567	0.0036	459	11	463	22	481	85
51	12.9	133.4	132.9	1.0	0.0718	0.0017	0.5524	0.0315	0.0558	0.0035	447	10	447	21	444	84
52	6.5	44.8	54.0	0.8	0.0731	0.0022	0.6149	0.0528	0.0610	0.0055	455	13	487	33	640	134

测 点	元素含量(×10 ⁻⁶)及比值				同位素比值						年龄(Ma)					
	Pb [*]	Th	U	$\frac{\text{Th}}{\text{U}}$	$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$		$\frac{n(^{206}\text{Pb})}{n(^{238}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{235}\text{U})}$		$\frac{n(^{207}\text{Pb})}{n(^{206}\text{Pb})}$	
					测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ	测值	1σ
53	12.1	123.2	128.5	1.0	0.0717	0.0019	0.6186	0.0435	0.0626	0.0047	447	12	489	27	693	104
54	10.9	73.6	79.4	0.9	0.0735	0.0036	0.6347	0.1071	0.0627	0.0109	457	22	499	67	696	282
55	9.4	76.1	100.1	0.8	0.0714	0.0017	0.5324	0.0320	0.0541	0.0035	445	10	433	21	373	91
56	11.9	89.8	119.0	0.8	0.0721	0.0018	0.5660	0.0334	0.0570	0.0037	448	11	455	22	491	87
57	46.3	53.8	119.2	0.5	0.3207	0.0067	4.8188	0.1219	0.1090	0.0037	1793	33	1788	21	1783	21
58	20.8	173.9	130.0	1.3	0.0686	0.0017	0.8309	0.0432	0.0879	0.0051	411	11	428	49	516	319
59	10.8	89.1	84.5	1.1	0.0764	0.0023	0.9075	0.0677	0.0862	0.0069	475	14	656	36	1342	98
60	17.9	228.7	170.6	1.3	0.0712	0.0016	0.5555	0.0267	0.0566	0.0030	443	10	449	17	476	66
61	10.5	88.1	112.9	0.8	0.0735	0.0017	0.5665	0.0290	0.0559	0.0032	457	10	456	19	450	73
62	7.6	70.8	76.4	0.9	0.0738	0.0021	0.5701	0.0480	0.0560	0.0050	459	13	458	31	454	136
63	15.5	108.6	129.1	0.8	0.0726	0.0022	0.6207	0.0529	0.0620	0.0056	452	13	490	33	675	131
64	13.3	153.8	138.0	1.1	0.0710	0.0018	0.6122	0.0403	0.0626	0.0044	442	11	485	25	694	96
65	26.2	317.6	220.2	1.4	0.0679	0.0015	0.5169	0.0219	0.0553	0.0027	423	9	423	15	424	56
66	16.6	186.3	148.3	1.3	0.0726	0.0034	0.6059	0.0972	0.0606	0.0100	452	20	481	61	625	271
67	24.1	57.9	90.5	0.6	0.2155	0.0047	2.5293	0.0822	0.0852	0.0034	1258	25	1281	24	1319	32
68	26.0	404.2	244.6	1.7	0.0715	0.0020	0.6114	0.0458	0.0620	0.0050	445	12	484	29	675	113
69	14.7	155.4	150.4	1.0	0.0721	0.0016	0.5445	0.0259	0.0548	0.0029	449	10	441	17	404	67
70	21.0	267.0	202.2	1.3	0.0687	0.0016	0.5955	0.0296	0.0630	0.0035	428	10	474	19	707	66
71	8.9	74.8	91.9	0.8	0.0765	0.0019	0.5888	0.0396	0.0559	0.0040	475	12	470	25	446	104
72	28.2	155.2	143.5	1.1	0.1357	0.0033	1.3751	0.0667	0.0736	0.0040	820	19	878	29	1030	60
73	17.1	228.0	164.2	1.4	0.0704	0.0018	0.6058	0.0391	0.0624	0.0044	439	11	481	25	689	94
74	10.9	109.2	112.1	1.0	0.0717	0.0017	0.5655	0.0317	0.0573	0.0035	446	10	455	21	502	82
75	13.0	76.4	80.4	0.9	0.1277	0.0042	1.2465	0.1103	0.0709	0.0066	775	24	822	50	954	128
76	25.8	300.1	210.1	1.4	0.0731	0.0017	0.5740	0.0286	0.0570	0.0032	455	10	461	18	493	69
77	7.0	65.0	74.2	0.9	0.0727	0.0027	0.5635	0.0716	0.0563	0.0074	453	16	454	47	462	216
78	10.4	108.6	109.0	1.0	0.0726	0.0041	0.5489	0.1153	0.0549	0.0118	452	25	444	76	409	347
79	50.9	496.6	262.4	1.9	0.0717	0.0022	0.9259	0.0690	0.0937	0.0075	426	15	431	76	460	433
81	42.6	125.4	171.8	0.7	0.1927	0.0040	2.1158	0.0587	0.0797	0.0029	1136	22	1154	19	1190	26
82	24.8	79.5	119.0	0.7	0.1652	0.0035	1.6482	0.0544	0.0725	0.0029	986	19	989	21	999	35
83	8.2	71.3	87.1	0.8	0.0718	0.0020	0.5770	0.0455	0.0584	0.0049	447	12	463	29	545	124
84	12.2	133.3	121.6	1.1	0.0718	0.0016	0.5456	0.0264	0.0552	0.0030	447	10	442	17	420	68
85	17.8	166.5	144.4	1.2	0.0695	0.0016	1.0433	0.0378	0.1090	0.0048	407	10	437	42	597	272

注:测点号前省略了“JS-1-”。

477Ma,峰值为 454Ma,占总体的 72.5%,呈现出强烈的峰值;第二组为中—新元古代的 588~1548Ma,峰值为 962Ma,占总体的 22.5%;第三组为古元古代的 1612~2496Ma 锆石年龄信息,占总体的 5%(图 4)。

4 讨论

4.1 区域峰值年龄事件

(1) 北秦岭造山带:研究表明,北秦岭地区未发现太古宙岩石,自北而南依次出露宽坪岩群、二郎坪岩群、秦岭岩群、松树沟蛇绿岩片和丹凤岩群,各岩群之间均以大型剪切带和断裂为界,相互逆冲叠置(董云鹏等,2003),其中的秦岭岩群形成于古元

古代(2000~2200Ma)(张宗清等,1994),宽坪岩群的形成时代自中新元古代(1142~986Ma)(张宗清等,1994;张国伟等,2001)到早古生代(第五春荣等,2010),二郎坪岩群基性火山岩的形成时代为 463~475Ma(赵姣等,2012),丹凤岩群的形成时代争议较大,有早古生代(张国伟等,1988;陆松年等,2003)、新元古—早古生代(张宗清等,1996;张国伟等,1995)以及新元古代(张旗等,1995;裴先治等,2001)等不同认识,尽管对地层时代的认识上还存在较大的分歧,但其中所包含的年龄信息,有助于对鄂尔多斯盆地西南部碎屑物质来源提供物源对比的年龄信息。北秦岭地区广泛发育古元古代—古生代的岩体。如宝鸡胡店和太白巩坚沟的片麻状二长花

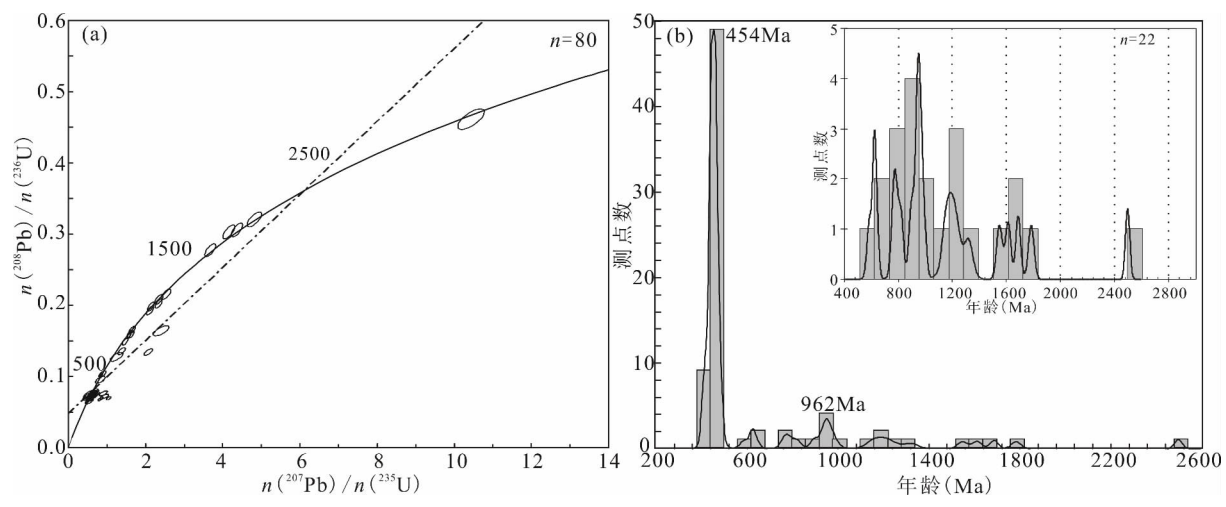


图 4 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图(a)与直方图(b)
Fig. 4 Zircon U-Pb Concordia diagram (a) and it's Histogram (b) in the detrital zircon
in the Pingliang Fm. on the southwestern margin of the Qrdos Basin

岗岩的年龄分别为 (1770 ± 13) Ma 和 (1741 ± 12) Ma (王洪亮等,2007),新元古代早期花岗质片麻岩的年龄多数集中在 955 ~ 844Ma (陆松年等,2003; Wang Tao et al.,2003;Chen Zhihong et al.,2006;刘丙祥等,2013)。北秦岭地区的早古生代花岗岩体显示有 $(505 \sim 470)$ Ma、 $(455 \sim 420)$ Ma 和 $(415 \sim 400)$ Ma 的年龄区间 (王涛等,2009;张成立等,2013)。此外,通过对宽坪岩群和秦岭岩群以及岩浆岩体的锆石 U-Pb 年龄 (第五春荣等,2010;杨力等,2010;万渝生等,2011;Shi Yu et al.,2013) 的统计结果显示存在 470Ma、694Ma、929 ~ 1000Ma、1164Ma、1788Ma、2500Ma 的峰值年龄信息 (图 5a)。

(2) 华北陆块: 华北陆块南缘带主要出露华北型的基底太华群、登封群、安沟群和熊耳群火山岩等 (董云鹏等,2003)。已有的研究表明,太华岩群的峰值年龄为 2.8 ~ 2.7Ga 以及 2.4 ~ 2.0Ga (第五春荣等,2007,2010;Yu Xinqi et al.,2013)。登封群和安沟群的锆石年龄测试结果显示其形成时代基本一致,为 2.5Ga (杨崇辉等,2009),熊耳群火山岩的形成时代跨度较大为 1.84 ~ 1.40Ga (赵太平等,2004)。此外,前人的研究结果 (赵太平等,2004; Wan Yusheng et al.,2006; 第五春荣等,2008; Xu Xisheng et al.,2009;Cui Minli et al.,2011;时毓等,2011;Zhou Yanyan et al.,2011) 显示的华北陆块存在 1788Ma、1917Ma、2310Ma、2500Ma 的峰值年龄事件 (图 5b)。

(3) 祁连造山带: 北祁连造山带与鄂尔多斯盆

地西南缘相接,向西包括六盘山逆冲推覆带,有可能成为鄂尔多斯地块西南缘的潜在物源区。北祁连造山带是在早古生代,由北祁连洋俯冲到华北板块西部阿拉善地块之下,随后于阿拉善地块碰撞而形成的加里东期造山带。其内部岩浆事件主要与北祁连洋消减产生的岛弧岩浆作用 $(510 \sim 460)$ Ma 以及同碰撞或碰撞后花岗岩 $(460 \sim 420)$ Ma 有关 (吴才来等,2010;徐亚军等,2013)。此外,北祁连蛇绿岩和裂谷火山岩年龄主要集中在 700 ~ 500Ma 之间 (史仁灯等,2004;Tseng Chunyan et al.,2007)。已有的研究结果显示,祁连地区存在加里东期 550 ~ 424Ma,新元古代 953 ~ 723Ma,中元古代 1032 ~ 1192Ma 以及元古代—新太古代 1900Ma、2350Ma、2500Ma 的构造岩浆峰值年龄事件,并认为北祁连造山带内存在与华北板块基底岩系相一致的古老结晶基底 (何艳红等,2005;裴先治等,2012)。通过对祁连造山带基底岩系的碎屑锆石年龄和加里东期的岩体年龄 (何艳红等,2005;董国安等,2007b;李怀坤等,2007;徐旺春等,2007;何世平等,2011) 统计分析,结果显示存在 438Ma、879Ma、1179Ma、1982Ma、2500Ma 的峰值年龄事件 (图 5c)。

综上所述,北秦岭造山带、华北板块、祁连造山带分别具有各自的岩浆事件和锆石年龄谱分布特征。华北板块的岩浆事件主要集中在 1800Ma 之前,显示 2500Ma 和 1825Ma 的主要峰值年龄事件及 3319Ma 和 2178Ma 的次要峰值年龄事件;北秦岭地区主要存在中新元古代的 1188Ma 和 941Ma 及早古

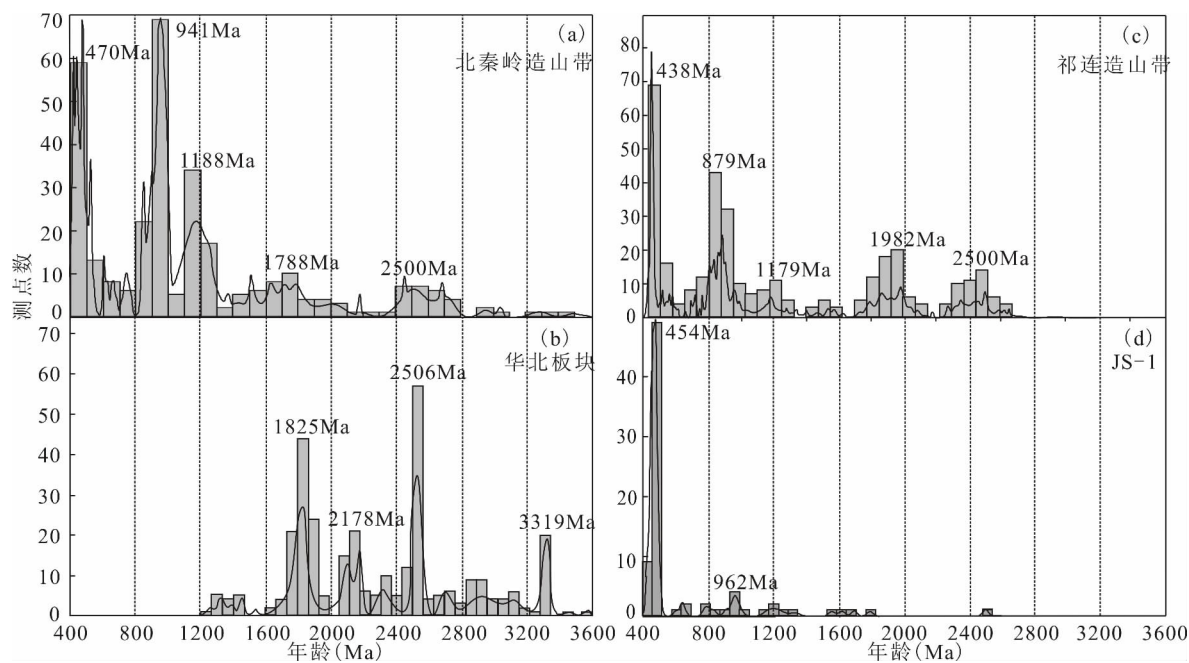


图 5 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组砂岩及邻区锆石 U-Pb 年龄谱分布特征
Fig. 5 Histogram of detrital zircons U-Pb ages of the Pingliang Fm. on the southwestern margin
of the Qrdos Basin and peripheral region

生代 470Ma 的峰值年龄事件,祁连与北秦岭地区相似,主要集中在 1800Ma 以来,尤其是新元古代 879Ma 和加里东期 438Ma 的年龄信息。

4.2 碎屑锆石物源分析

(1) 古元古代年龄信息: 测试分析获得的 $2496 \pm 16\text{Ma} (n = 1)$ 的锆石年龄信息。近年来,大量的锆石年代学已经证明了新太古代超大陆的聚合事件主要发生在 2.7Ga ~ 2.65Ga, 其峰值年龄为 2.7Ga (Condie et al., 2009a, 2010)。但是,华北克拉通早期的构造—热事件主要发生在大约 2.5Ga, 表现出与世界其它克拉通明显的不同,并在此期间形成大量的 TTG 片麻岩、幔源花岗岩和古老的地质体的一期强烈的破坏和再循环事件 (Zhai Mingguo et al., 2005; Zhao Guochun, 2001; Diwu chunrong et al., 2011)。地球物理资料证实,虽然鄂尔多斯盆地具有太古代基底,但是被寒武纪以来的中生代地层覆盖,没有古老的岩石出露 (Chen Ling et al., 2009)。鄂尔多斯盆地西南周缘小秦岭、北秦岭—祁连一带出露的太华杂岩和陇山杂岩是晚太古代形成的一套高级变质泥质碎屑岩—火山岩组合,形成于 2.9Ga ~ 2.5Ga 左右,可作为该时期锆石母岩源区。

(2) 1783 ~ 1612Ma (n = 3) 的锆石年龄信息:

在 1.85Ga 前后,华北克拉通基底西部陆块与东部陆块沿中部带发生碰撞拼合而形成现今的华北克拉通基底。即吕梁运动使得中国华北地区早期不同陆块最终碰撞、拼合,形成华北克拉通统一的结晶基底,并与全球 Columbia 超大陆汇聚主要峰期时间相一致,表明华北古大陆属于 Columbia 超大陆的组成部分。华北克拉通内部发育有大量 1.78Ga 以来的未变质的基性岩墙群,南部发育的熊耳群火山岩锆石 U-Pb 年龄在 2.2Ga ~ 1.7Ga 之间 (赵太平, 2004),还分布有 1.65Ga 前后的碱性花岗岩类,如龙王撞岩体,锆石 SHRIMP 年龄为 $1611 \pm 19\text{Ma} \sim 1625 \pm 16\text{Ma}$ (陆松年等, 2003),此外,北秦岭地区存在该时期的 1788Ma 的峰值年龄 (图 5a),也可为该阶段的锆石提供物源。

(3) 中—新元古代年龄信息: 近年来的研究表明,华北克拉通中元古界自 1.6Ga 以后,沉积了巨厚的碳酸盐地层,构造上处于一种相对宁静的状态,这种状态一直持续到 1.0Ga。样品中存在 1548 ~ 1150Ma (n = 6) 的锆石年龄信息,与周缘区域锆石年龄谱对比,北秦岭和祁连造山带存在 1188Ma 和 1179Ma 的锆石峰值年龄信息,均可为该阶段的锆石提供物源。986 ~ 895Ma (n = 6) 的锆石年龄信息,反应锆石母岩源区经历和记录了与 Rodinia 全球超大

陆汇聚有关的年龄事件。目前尚未在华北克拉通内部及南缘发现与 Rodinia 汇聚与破裂有关的大规模的热构造地质事件记录,而北秦岭岩群中的新元代深成侵入体并不是华北南缘的地质记录,而是扬子克拉通与北秦岭变质地体之间晋宁期造山作用的产物(陆松年等,2004),并且在北秦岭构造带秦岭岩群和宽坪岩群等不同地层单元中均已获得大量 1.0Ga 左右的变质年龄(刘国惠等,1993;张宗清等,1994;张成立等,2004),与之相邻的祁连造山带也存在该阶段的锆石年龄信息(图 5c),推测该阶段锆石源区主体应来源于北秦岭造山带,祁连造山带也为研究区范围提供少量的物源。820Ma($n=1$)锆石年龄信息,记录了与 Rodinia 全球超大陆在 830Ma 开始裂解有关的年龄事件(陆松年等,2004)。该阶段的年龄事件主要记录在祁连造山带,北秦岭地区的锆石年龄谱中也有少量分布,推测锆石母岩源区来自于相邻区的祁连造山带和北秦岭造山带。775 ~ 588Ma($n=41$)的锆石年龄信息,北秦岭和祁连造山带的锆石年龄谱显示有该阶段的锆石年龄信息,可作为该阶段碎屑锆石的物源。

(4) 早古生代年龄信息:从奥陶纪开始,由于古秦岭洋壳板块向北俯冲—消减,至中、晚奥陶世,北秦岭已发展为华北古板块南缘的具有沟、弧、盆体系的古活动大陆边缘(周鼎武等,2002),477 ~ 407Ma($n=22$)的锆石年龄区间及相应的 454Ma $\pm$ 的峰值年龄是对该时期构造转换活动的响应。北秦岭地区和祁连地区分别存在 505 ~ 400Ma(王涛等,2009)和 510 ~ 420Ma(吴才来等,2010)的早古生代花岗岩体,说明北秦岭造山带和祁连造山带均可作为鄂尔多斯盆地西南缘平凉组提供物源。此外,本次测试分析的碎屑锆石中出现了 442 ~ 407Ma($n=11$, 谐和度为 90% ~ 110%)的锆石年龄信息,对该组年轻锆石年龄所代表的地质意义需进一步讨论。

综合分析研究区周边区域地质特征,结合上述年龄谱分布特征与碎屑锆石年龄的相似程度推断,华北地块、祁连造山带、北秦岭造山带都存在为鄂尔多斯盆地西南缘平凉组碎屑岩提供物质来源的可能性。综合分析对比显示,北秦岭造山带和祁连造山带的岩浆岩年龄与本次研究的碎屑锆石年龄具有较好的对应性,进一步从盆地沉积物物源方面,证实了北秦岭和祁连地区在晚奥陶世平凉期已经发展为具有沟、弧、盆体系的古活动大陆边缘,并且形成的寒武—奥陶纪岛弧型岩浆岩和新元古代岩浆岩以及造山带的结晶基底岩系(秦岭岩群和陇山杂岩)都可

能为鄂尔多斯盆地西南部上奥陶统平凉组碎屑岩提供物源。

5 结论

(1) 鄂尔多斯盆地西南缘上奥陶统平凉组细砂岩中的碎屑锆石 U-Pb 同位素年龄可明显分为 3 组:第一组为早古生代的 407 ~ 477Ma,峰值为 454Ma;第二组为中—新元古代的 588 ~ 1548Ma,峰值为 962Ma,第三组为古元古代的 1612 ~ 2496Ma 的锆石年龄信息。

(2) 经过对上奥陶统平凉组碎屑锆石 U-Pb 年龄综合分析,平凉组碎屑沉积物质来源复杂,具有明显的多源性,有北秦岭造山带、祁连造山带和华北板块基底 3 个物源区。其北秦岭造山带和祁连造山带提供了大部分的物源,通过对比分析认为北秦岭造山带是二者之中较重要的物源贡献区。

(3) 本次测试分析获得碎屑锆石年龄主要峰值年龄 454Ma,与北秦岭和祁连造山带获得的早古生代岩体的峰值年龄较为接近,表明鄂尔多斯盆地西南缘的构造背景在上奥陶统平凉期已经由被动大陆边缘转化为具有沟—弧—盆体系的活动大陆边缘。

致谢:样品锆石的 CL 图像拍摄和数据测试分析得到西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明教授、弓化栋博士、庞云龙老师的帮助,以及审稿专家张拴宏研究员,提出的修改意见,在此一并表示感谢。

参 考 文 献 / References

- 陈强,李文厚,贾德生,张慧元. 2009. 陕西岐山地区奥陶系地层及沉积相研究. 第五届全国油气储层学术研讨会.
- 第五春荣,孙勇,林慈鉴,柳小明,王洪亮. 2007. 豫西宜阳地区 TTC 质片麻岩锆石 U-Pb 定年和 Hf 同位素地质学. 岩石学报, 23 (2): 253 ~ 262.
- 第五春荣,孙勇,刘良,张成立,王洪亮. 2010. 北秦岭宽坪岩群的解体及新元古代 N-MORB. 岩石学报, 26 (7): 2025 ~ 2038.
- 第五春荣,孙勇,袁洪林,王洪亮,钟兴平,柳小明. 2008. 河南登封地区嵩山石英岩碎屑锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成及其地质意义. 科学通报, 53 (16): 1923 ~ 1934.
- 董国安,杨怀仁,杨宏仪,刘敦一,张建新,万渝生,曾建元. 2007. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. 科学通报, 52 (13): 1572 ~ 1585.
- 董云鹏,张国伟. 2003. 北秦岭构造属性与元古代构造演化. 地球学报, 24 (1): 3 ~ 10.
- 何世平,李荣社,王超,于浦生,张宏飞,辜平阳,时超. 2011. 南祁连东段化隆岩群形成时代的进一步限定. 岩石矿物学杂志, 30 (1): 34 ~ 44.
- 何艳红,孙勇,陈亮,李海平,袁洪林,柳小明. 2005. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. 岩石学报, 21 (2): 125 ~ 134.

- 胡波,翟明国,郭敬辉,彭澎,刘富,刘良. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS 年龄及其构造意义. 岩石学报, 25(1):193~211.
- 李怀坤,陆松年,相振群,周红英,李惠民,刘敦一,宋彪,郑健康,顾瑛. 2007. 北祁连山西段北大河岩群碎屑锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究. 地质论评, 53(1):132~140.
- 李亚萍,李锦轶,孙桂华,朱志新,杨之青. 2007. 准噶尔盆地基底的探讨:来自原泥盆纪卡拉麦里组砂岩碎屑锆石的证据. 岩石学报, 23(7):1577~1590.
- 刘丙祥,聂虎,齐襄,杨力,祝禧艳,陈福坤. 2013. 豫西南地区北秦岭地体新元古代花岗岩类岩石成因及其地质意义. 岩石学报, 29(7):2437~2455.
- 刘池洋,赵红格,桂小军,岳乐平,赵俊峰,王建强. 2006. 鄂尔多斯盆地演化—改造的时空坐标及其成藏(矿)响应. 地质学报, 80(5):617~638.
- 陆松年,李怀坤,陈志宏,郝国杰,周红英,郭进京,牛广华,相振群. 2003. 秦岭中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应. 北京:地质出版社,1~204.
- 陆松年,李怀坤,陈志宏,于海峰,金巍,郭坤一. 2004. 新元古时期中国古大陆与罗迪尼亚超大陆的关系. 地学前缘, 11(2):515~523.
- 裴先治,李厚民,李国光. 2001. 东秦岭丹凤岩群的形成时代和构造属性. 岩石矿物学杂志, 20(2):181~188.
- 裴先治,李佐臣,李瑞保,裴磊,刘成军,高景民,魏方辉,吴树宽,王银川,陈有妍. 2012. 祁连造山带东段早古生代葫芦河群变质碎屑岩中碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄:源区特征和沉积时代的限定. 地学前缘, 19(5):205~224.
- 时毓,于津海,徐夕生,唐红峰,邱检,陈立辉. 2011. 陕西小秦岭地区太华群的锆石 U-Pb 年龄和 Hf 同位素组成. 岩石学报, 27(10):3095~3108.
- 史仁灯,杨经绥,吴才来,Wooden J. 2004. 北祁连玉石沟蛇绿岩形成于晚震旦世 SHRIMP 年龄证据. 地质学报, 78(5):649~657.
- 万渝生,刘敦一,董春艳,殷小艳. 2011. 西峡北部秦岭群变质沉积岩锆石 SHRIMP 定年:物源区复杂演化历史和沉积、变质时代确定. 岩石学报, 27(4):1172~1178.
- 王洪亮,何世平,陈隽璐,徐学义,孙勇,第五春荣,李海平. 2007. 北秦岭西段胡店片麻状二长花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 中国地质, 31(1):17~25.
- 王涛,王晓霞,田伟,张成立,李伍平,李舫. 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学 D 辑:地球科学, 39(7):949~971.
- 吴才来,徐学义,高前明,李向民,雷敏,郝源红, Frost R B. Wooden J L. 2010. 北祁连早古生代花岗岩质岩浆作用及构造演化. 岩石学报, 26(4):1027~1044.
- 徐旺春,张宏飞,柳小明. 2007. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义. 科学通报, 52(10):1174~1180.
- 徐亚军,杜远生,杨江海. 2013. 北祁连造山带晚奥陶世—泥盆纪构造演化:碎屑锆石年代学证据. 地球科学, 35(8):934~946.
- 杨崇辉,杜利林,任留东,万渝生,宋会侠,原振雷,王世炎. 2009. 华北克拉通南缘安沟群的 SHRIMP 年龄及地层对比. 岩石学报, 25(8):1853~1862.
- 杨力,陈福坤,杨一增,李双庆,祝禧艳. 2010. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄:北秦岭地质体中—新元古代岩浆作用和早古生代变质作用的记录. 岩石学报, 26(5):1589~1603.
- 张成立,刘良,王涛,王晓霞,李雷,龚齐福,李小菲. 2013. 北秦岭早古生代大陆碰撞过程中的花岗岩岩浆作用. 科学通报, 58(23):2323~2329.
- 张成立,刘良,张国伟,王涛,陈丹玲,袁洪林,柳小明,晏云翔. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义. 地学前缘, 11(3):33~42.
- 张国伟,张本仁,袁学诚,肖庆辉. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京:科学出版社,1~885.
- 张国伟,张宗清,董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2):104~114.
- 张国伟. 1988. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安:西北大学出版社,1~92.
- 张旗,张宗清,孙勇,韩松. 1995. 陕西商县—丹凤地区丹凤群变质玄武岩的微量元素和同位素地球化学. 11(1):43~54.
- 张宗清,刘敦一,付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京:地质出版社,1~191.
- 张宗清,张国伟,付国民,唐索寒,宋彪. 1996. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. 中国科学(D 辑:地球科学), 26(3):216~223.
- 赵太平,翟明国,夏斌,李惠民,张毅星,万渝生. 2004. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究:对华北克拉通盖层发育初始时间的制约. 科学通报, 49(22):2342~2349.
- 周鼎武,李文厚,张云翔,张成立. 2002. 区域地质综合研究的方法与实践:鄂尔多斯盆地—秦岭造山带地质野外实习指导书. 北京:科学出版社,1~347.
- 赵蛟,陈丹玲,谭清海,陈森,朱小辉,郭彩莲,刘良. 2012. 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. 地学前缘, 19(4):118~125.
- Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb . Chemical Geology, 192(1~2):59~79.
- Balintoni I, Balica C, Ducea M N, Chen F K, Hann H P, Sabiovski V. 2009. Late Cambrian—Early Ordovician Gondwanan terranes in the Romanian Carpathians: A zircon U-Pb provenance study. Gondwana Research, 16(1):119~133.
- Belousova E A, Griffin W L, O'Reilly S Y, Fisher N J. 2002. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type. Contrib. Miner. Petrol., 143: 602~622.
- Cawood P A, Nemchin A A. 2000. Provenance record of a rift basin: U/Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia. Sedimentary Geology, 134:209~234.
- Chen Ling, Cheng Cheng, Wei Zigen. 2009. Seismic evidence for significant lateral variations in lithospheric thickness beneath the central and western North China Craton. Earth and Planetary Science Letters, 286(1~2):171~183.
- Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Huaikun, Li Huimin, Xiang Zhenqun, Zhou Hongying, Song Biao. 2006. Constraining the role of the Qingling orogeny in the assembly and break up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences. Journal of Asian Earth Sciences, 28:99~115.
- Condie K C, Belousova E, Griffin W L, Sircombe K N. 2009. Granitoid events in space and time: constraints from igneous and detrital zircon age spectra. Gondwana Research, 15:228~242.
- Crofu F, Hanchar J M, Hoskin P W O, Kinny P. 2003. Atlas of zircon textures. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 53: 469~495.
- Cui Minli, Zhang Baolin, Zhang Lianchang. 2011. U-Pb dating of baddeleyite and zircon from the Shizhaigou diorite in the southern margin of North China Craton: Constrains on the timing and tectonic setting of the Paleoproterozoic Xiong'er group. Gondwana Research, 20:184~193.
- Dickinson W R, Gehrels G E. 2009. Use of U-Pb ages of detrital zircons to infer maximum depositional ages of strata: A test against a Colorado Plateau Mesozoic database. Earth and Planetary Science

- Letters, 288:115 ~ 125.
- Diwu Chunrong, Sun Yong, Guo Anlin, Wang Hongliang, Liu Xiaoming. Crustal growth in the North China Craton at ~2.5 Ga: Evidence from in situ zircon U-Pb ages, Hf isotopes and whole-rock geochemistry of the Dengfeng complex. *Gondwana Research*, 2011, 20:149 ~ 170.
- Dong Yunpeng, Zhang Guowei, Neubauer F, Liu Xiaoming, Genser J. Hauzenberger C. 2011. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis. *Journal of Asian Earth Sciences*, 41: 213 ~ 237.
- Dong Yunpeng, Liu Xiaoming, Neubauer F, Zhang Guowei, Tao Ni, Zhang Yiguo, Zhang Xiaoning, Li Wei. 2013. Timing of Paleozoic amalgamation between the North China and South China Blocks: Evidence from detrital zircon U-Pb ages. *Tectonophysics*, 586:173 ~ 191.
- Geslin J K, Link P K, Fanning C M. 1999. High precision provenance determination using detrital zircon ages and petrography of Quaternary sands on the eastern Snake River Plain, Idaho. *Geology*, 27(4):295 ~ 298.
- Morton A C, Claeue-Long J C, Berge C. 1996. Shrimp constraints on sediment provenance and transport history in the Mesozoic Statfjord Formation, North Sea. *Journal of the Geological society*, 153(6): 915 ~ 929.
- Rainbird R H, Hamilton M A, Young G M. 2001. Detrital zircon geochronology and provenance of the Torridonian, NW Scotland. *J. Geol. Soc. (Lond.)*, 158:15 ~ 27.
- Shi Yu, Yu Jinhai, Santosh M. 2013. Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes. *Precambrian Research*, 231:19 ~ 60.
- Sun Weihua, Zhou Meifu, Gao Jianfeng, Yang Yueheng, Zhao Xinfu, Zhao Junhong. 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China. *Precambrian Research*, 172: 99 ~ 126.
- Surpless K D, Graham S A, Covault J A, Wooden J L. 2006. Does the Great Valley Group contain Jurassic strata? Reevaluation of the age and early evolution of a classic foreland basin. *Geology*, 34:21 ~ 24.
- Tseng C Y, Yang H J, Yang H Y, Liu D Y, Tsai C L, Wu H G, Zuo G C. 2007. The Dongcaohu ophiolite from the North Qilian Mountains: a fossil oceanic crust of the Paleo-Qilian Ocean. *Chinese Science Bulletin*, 52(17):2390 ~ 2401.
- Wan Yusheng, Wilde S A, Liu Dunyi, Yang Changxiu, Biao Song, Yin Xiaoyan. 2006. Further evidence for ~1.85 Ga metamorphism in the Central Zone of the North China Craton: SHRIMP U-Pb dating of zircon from metamorphic rocks in the Lushan area, Henan Province. *Gondwana Research*, 9:189 ~ 197.
- Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, O'Reilly S Y. 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks. *Precambrian Research*, 177:131 ~ 144.
- Wang Tao, Wang Xiaoxiao, Zhang Guowei, Pei Xianzhi, Zhang Chengli. 2003. Remnants of a Neoproterozoic collisional orogenic belt in the core of the Phanerozoic Qinling orogenic belt (China). *Gondwana Research*, 6(4):699 ~ 710.
- Xu Xisheng, Griffin W L, Ma Xi, O'Reilly S Y, He Zhenyu, Zhang Chengli. 2009. The Taihua Group on the southern margin of the North China craton: Further insights from U-Pb ages and Hf isotope compositions of zircons. *Mineral. Petrol.* 97(1~2): 43 ~ 59.
- Yang Jinhui, Wu Fuyuan, Shao Ji'an, Wild S A, Xie Liewen, Liu Xiaoming. 2006. Constraints on the timing of uplift of the Yanshan Fold and Thrust Belt, North China. *Earth and Planetary Science Letters*, 246:336 ~ 352.
- Yu Xinqi, Liu Jinlai, Li Chunli, Chen Shuaisi, Dai Yanpei. 2013. Zircon U-Pb dating and Hf isotope analysis on the Taihua Complex: Constraints on the formation and evolution of the Trans-North China Orogen. *Precambrian Research*, 230:31 ~ 44.
- Zhai Mingguo, Guo Jinghui, Liu Wenjun. 2005. Neoproterozoic to Paleoproterozoic continental evolution and tectonic history of the North China Craton: a review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 24(5):547 ~ 561.
- Zhao Guochun. 2001. Palaeoproterozoic assembly of the North China Craton. *Geological Magazine*, 138(1):87 ~ 91.
- Zhou Yanyan, Zhao Taiping, Wang C Y, Hu Guohui. 2011. Geochronology and geochemistry of 2.5 to 2.4 Ga granitic plutons from the southern margin of the North China Craton: Implications for a tectonic transition from arc to post-collisional setting. *Gondwana Research*, 20:171 ~ 183.

U-Pb Dating of Detrital Zircon from Upper Ordovician Pingliang Formation in Southwest Margin of the Ordos Basin and Provenance Analysis

YANG Fu¹⁾, CHEN Gang¹⁾, CHEN Qiang²⁾, DING Chao³⁾, GAO Lei¹⁾,
LEI Panpan¹⁾, ZHANG Wenlong¹⁾, SHI Xiaolin¹⁾, TONG Mingjun⁴⁾

1) Department of Geology, State Key Laboratory of Continental Dynamics, Northwest University, Xi'an, 710069;

2) College of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an, 710054;

3) School of Earth Science and Engineering, Xi'an Shiyou University, Xi'an, 710065;

4) Shaanxi Yanchang Petroleum International Exploration and Development Engineering Co., Ltd, Xi'an, 710075

Abstract: The U-Pb ages of single zircon grains contained in the sandstone samples were analyzed by the LA-ICP-MS method, the sediment provenances and geological significance were discussed. The results show that: ① The detrital zircon age of the tuffaceous sandstone from the Upper Ordovician Pingliang Formation can be obviously

divided into three groups, the first group is Early Paleozoic which ranges from 407 ~ 477Ma, the peak value is 454Ma, accounting for about 72.5% of the total dates. The second group is Meso—Neoproterozoic which ranges from 588 ~ 1548Ma, the peak value is 962Ma, accounting for about 22.5% of the total dates. The last group is Paleoproterozoic which ranges from 1612 ~ 2496Ma, accounting for about 5% of the total dates. ② The group of 407 ~ 477Ma indicates that its material provenances may mainly come from the North Qinling—Qilian island-arc complex belt in adjacent regions. The group between 588 ~ 1548Ma and 1612 ~ 2496Ma indicates that its material provenances were mainly from the North Qinling orogenic belt and the Qilian orogenic belt, with the little of material from the basement of North China block. ③ A comprehensive analysis shows that the material provenances of Pingliang Formation were much more complicated and characterized by obvious diversity and complexity. The indication is that sedimentary environment is the limits of residual marginal sea basin between North Qinling—Qilian island-arc complex belt and the southwest of Ordos block in the Pingliang age Ordovician.

Keywords: Upper Ordovician Pingliang Formation; zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; provenance analysis; Ordos Basin