

北秦岭灵官庙盆地砂岩碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄

李兴辉, 郭安林, 李侃, 高春云

LI Xing-hui, GUO An-lin, LI Kan, GAO Chun-yun

大陆动力学国家重点实验室/西北大学地质学系, 陕西 西安 710069

State Key Laboratory of Continental Dynamics/Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, Shaanxi, China

摘要:秦岭造山带在印支造山作用主造山期之后,发育一系列晚三叠世—早侏罗世伸展断陷盆地。选择陕西丹凤北秦岭灵官庙盆地中低绿片岩相的灰绿色中细粒砂岩,进行碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析。结果表明,85 个以岩浆成因为主的碎屑锆石给出 5 个年龄组:426~605Ma、661~1174Ma、1494~1789Ma、2113~2261Ma 和 2826~3298Ma。其中,最年轻的锆石年龄为 $426\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$,最老的锆石年龄为 $3298\text{Ma} \pm 70\text{Ma}$ 。主要的年龄峰期为 426~605Ma 年龄组,其次为 661~1174Ma 年龄组。这一年龄结构反映出物源区加里东造山期和 Grenvillian 期岩浆活动的重要影响。年龄谱中缺少中志留世—晚三叠世的锆石,说明普遍发育的印支期岩浆岩体并不构成物源区。通过与现今周缘地体年龄结构对比并结合其他地质证据认为,灵官庙盆地的物源可能主要来自加里东期侵入于二郎坪群、秦岭群中的花岗岩和新元古代宽坪群,少量来自二郎坪群和秦岭群。灵官庙盆地形成之后,盆地内沉积岩遭受了变质变形作用,记录了秦岭造山带在板块构造驱动的造山作用结束后进入了新的陆内造山作用阶段。

关键词:北秦岭; T_3 - J_1 伸展断陷盆地; 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄; 物源分析

中图分类号: P588.21⁺2.3; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2014)09-1353-10

LI X H, GUO A L, LI K, GAO C Y. LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircon from Lingguanmiao basin in North Qinling. *Geological Bulletin of China*, 2014, 33(9): 1353-1362

Abstract: A number of T_3 - J_1 rift basins were developed in the Qinling orogen after the main orogenic episode of the Indosinian orogeny. Selecting grayish green and moderate-fine grained sandstone metamorphosed to low-greenschist facies from the Lingguanmiao basin of the North Qinling orogenic belt in Danfeng County of Shaanxi Province and conducting LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb isotope analysis, the authors attempted to establish the age structure of the sedimentary rocks in the basin and infer the provenance and its variation. The result reveals that the 85 analytical points of the magma-genetic detrital zircons yielded five age groups: 426~605Ma, 661~1174Ma, 1494~1789Ma, 2113~2261Ma and 2826~3298Ma. Among the ages, the youngest age is $426\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$, and the oldest is $3298\text{Ma} \pm 70\text{Ma}$. The major age groups are 426~605Ma and 661~1174Ma. The age structure reflects the tectono-magmatic events occurring in the source region during the Caledonian and Grenvillian orogenic periods, respectively. In addition, the lack of the ages from the Middle Silurian to Late Triassic can be attributed to the assumption that the widespread Indosinian magmatic bodies failed to make contribution to the source due to their poor development in North Qinling. In comparison with the age data from the surrounding terranes and in conjunction with other geological evidence, the authors hold that the provenance of the Lingguanmiao basin might mainly have come from the Neoproterozoic Kuanping Group and the Caledonian granites which had intruded

收稿日期: 2014-03-14; 修订日期: 2014-08-04

资助项目: 国家基础科学人才培养基金项目(编号: XDCX2012-07)、秦岭成矿带地质矿产调查评价成果集成项目(编号: 12120113047600)及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: YPH0800)

作者简介: 李兴辉(1991-), 男, 在读本科生, 地质学(基地班)专业。E-mail: 240308663@qq.com

into Erlangping and Qinling Groups, with the addition of a small amount of material from the Paleozoic Erlangping and Proterozoic Qinling complex. After the formation of Lingguanmiao basin, the sedimentary rocks in the basin suffered strong metamorphism and deformation, which might record the new intracontinental orogeny that Qinling experienced since the ending of the Indosinian orogeny set forth by plate tectonics.

Key words: North Qinling; T_3-J_1 rift basin; detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb ages; provenance analysis

秦岭造山带属于典型的大陆复合型造山带,经历了长期、多期次的构造演化。在主造山期板块构造演化阶段(Pt_3-T_2)后,秦岭造山带于晚三叠世进入后碰撞造山阶段的动力学调整,期间的拆沉作用导致地壳上部伸展构造的发育,并形成一系列晚三叠世—早白垩世伸展断陷盆地。近年来,对盆地沉积物源区的追索以及借此反演盆山耦合关系成为研究热点。国内外学者^[1-2]普遍应用同位素年代学方法进行沉积物源区示踪研究,如通过对盆地中碎屑锆石 U-Pb 年龄谱研究并结合周缘地质体对比而界定物源区。在此基础上,进一步推断沉积物源区的构造演化特征。由于陕西丹凤县北秦岭灵官庙盆地碎屑沉积岩发育、周缘地体具有丰富的年代学数据,因此具有较好的研究条件。此外,前人从未涉及包括灵官庙盆地在内的北秦岭晚三叠世—早白垩世盆地的锆石年代学研究。因此,笔者选取该盆地进行碎屑锆石 U-Pb 年龄研究,并兼顾盆地中沉积岩变质变形的考查。通过此项研究,期望达到以下目的:①根据碎屑锆石的最小年龄确定沉积岩沉积时代及盆地形成年龄下限;②建立灵官庙盆地锆石年龄结构,并与周缘地体进行对比,结合地质证据分析追索盆地沉积物物源区,进而恢复地史时期此区域地体可能的分布情况,并分析不同于现今分布情况的原因;③根据盆地内沉积岩经历的变质变形特征,为秦岭造山带在板块演化构造阶段结束后又开始新的以晚侏罗世—早白垩世为峰期的陆内造山作用提供证据。

1 区域地质背景

作为中国大陆中央造山带的主要组成部分,现今秦岭造山带呈“两带三块”的基本构造格架,由北向南依次为:华北地块南部—商丹缝合带—南秦岭—勉略缝合带—扬子地块北缘^[3]。而北秦岭构造带位于商丹缝合带以北,洛南—栾川断裂以南(图1),该带东西延伸千余千米,是秦岭造山带中从组成到构造最为复杂的地带,现今地表成大小不一的透镜状

岩块以不同级别规模和性质的断裂为骨架,总体构成指向南的高角度逆冲叠瓦推覆构造^[3]。构造岩石地层方面,北秦岭构造带地层发育情况复杂,主要岩石地层单元自北向南依次为:宽坪群(Pt_{2-3}),二郎坪群沉积—火山岩系(Pt_3-Pz_1),秦岭群(Pt_1)和丹凤群沉积—火山岩系(Pt_3-Pz)。除此之外,还存在松树沟蛇绿岩系(Pt_{2-3})、草凉驿组(C_{1-2})和中新生界拗陷陆相沉积岩层。以上各岩层单元彼此多以大型剪切带和断层构造关系相接触:北侧宽坪群向南逆冲推覆于二郎坪群之上,南侧秦岭群沿以子母沟群韧性剪切带为代表的自南向北的逆冲推覆构造也掩覆在二郎坪群之上,同时还叠加自北向南的逆冲及北西西—南东东向朱阳关—夏馆剪切走滑断裂^[3]。

包括灵官庙盆地在内的一系列伸展断陷盆地沿先存断裂带呈近东西向展布在北秦岭构造带内(图1),前人^[3]对盆地沉积地层化石的研究表明其主要形成于晚三叠世—早白垩世,并呈角度不整合于强烈变形的主造山期岩层之上。这些盆地西起陕西商南地区,东可延伸至河南境内,长达几十千米,宽窄不一,最宽处可达4~5km。在具有华北地块基底和盖层的东秦岭北缘发育有义马、洛阳、宜阳等盆地。盆地大多受不同类型的脆—韧性断裂构造(如伸展拆离、剪切走滑断裂带)控制,属于典型的伸展断陷盆地;盆地内部沉积作用受盆缘伸展构造控制,发育一系列正断层,形成露头尺度的堑垒构造,表现出半地堑型盆地的构造—沉积特征^[3]。这些断陷盆地和伴随出现的后碰撞花岗岩反映了造山带深部重力垮塌及随之的岩石圈拆沉作用,不仅表明印支期碰撞造山活动的结束,并且宣告秦岭造山带板块造山作用的终结。

2 盆地及周缘地质概况

2.1 灵官庙盆地地质概况及采样位置

灵官庙盆地位于陕西省丹凤县灵官庙地区,沿商丹缝合带北侧的首阳山—皇台—乔端—毛集断裂呈东西向延伸。根据1:200000商南幅^①描述,盆

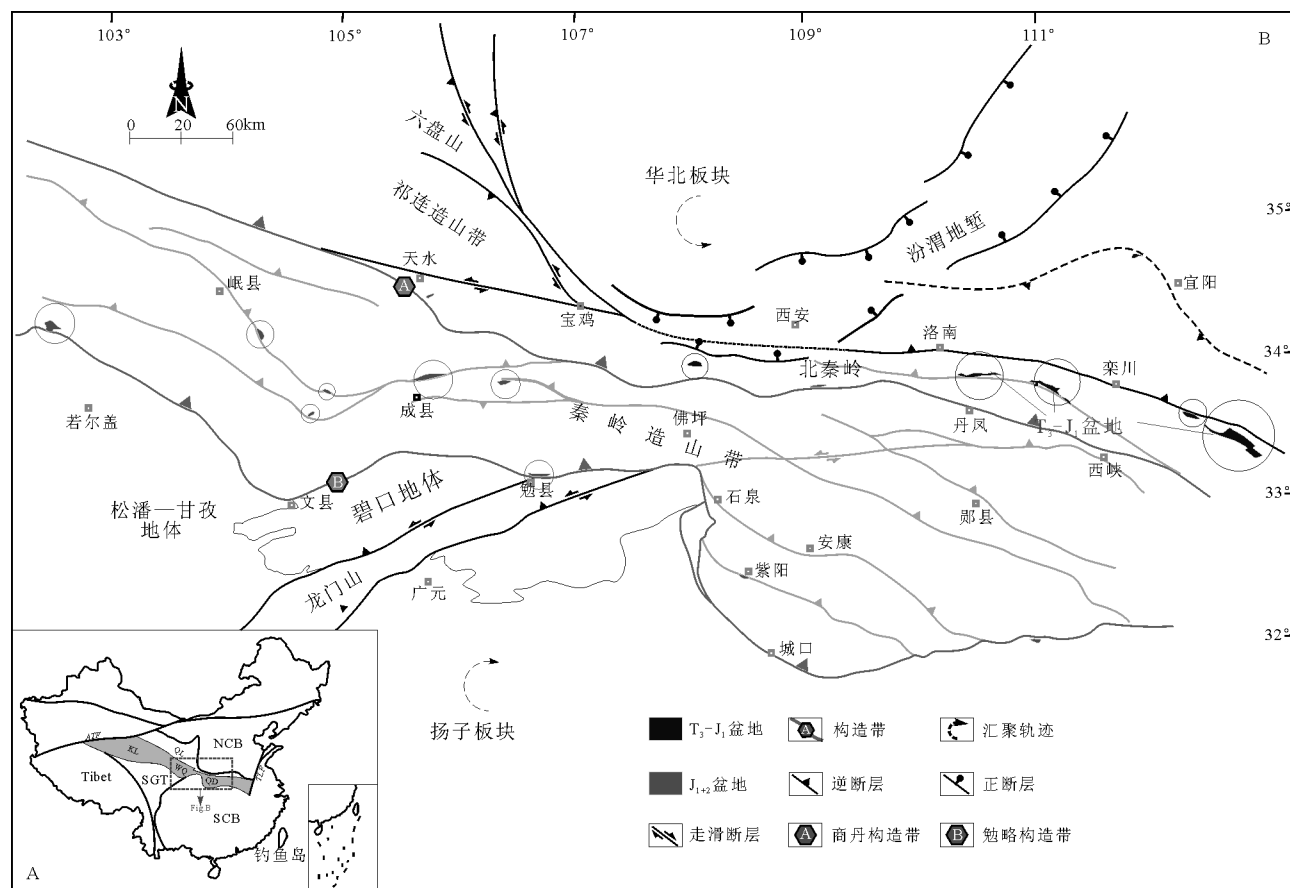


图1 秦岭现今结构构造及晚三叠世—早侏罗世盆地分布(据参考文献[3]修改)

Fig. 1 Present structure of Qinling and distribution of T_3 - J_1 basin

NCB—华北板块;SCB—华南海块;SGT—松潘—甘孜地体;ATF—阿尔金断裂;TLF—郯庐断裂;

QD—秦岭—大别山;WQ—西秦岭;KL—昆仑;QL—祁连

地中古生物组合面貌具有陆相生物群的特征,为晚三叠世延长植物群的 *Danaeopsis-Bernoullia* 组合,由此限定灵官庙盆地形成时代为晚三叠世。盆地内出露三叠纪地层,主要为灰黑色板岩(岩层产状为 $360^\circ \angle 28^\circ$)和灰绿色中细粒砂岩($348^\circ \angle 65^\circ$)。本文采集灰绿色中细粒砂岩样品进行锆石 U-Pb 年代学研究,采样位置坐标为 $N33^\circ 54' 46.2''$ 、 $E110^\circ 15' 55''$ 。

2.2 盆地岩层变质变形特征

盆地内岩层普遍发生低绿片岩相的变质作用,镜下观察发现板岩内部矿物粒径全部小于 0.1mm,具有鳞片—粒状变晶结构、变余粗粉砂结构,纹层状构造,主要由碎屑石英(6%~8%)、重结晶钠长石(32%~35%)、绿泥石(25%~28%)、绢云母(23%~25%)及少量铁线状凝聚物(5%~7%)组成,绿泥石等片状

矿物强烈定向排列构成千枚状片理,定名为千枚状板岩。砂岩样品具有碎屑结构与鳞片状变晶结构,其中碎屑结构由粗粉砂—细砂级陆源碎屑物呈现,鳞片状变晶结构由绿泥石、白云母、绢云母、文石和玉髓呈现;内部组成碎屑物略多于基质,碎屑物普遍表现应变较强,表面溶解,小颗粒变为骸晶,颗粒之间多不接触;基质内绿泥石、云母呈线状强定向排列,文石呈条带状定向排列,定名为变余泥质粗粉砂岩,可能为千枚状板岩的原岩。盆地内岩层还发生广泛构造变形,可见灰黑色板岩受构造作用影响形成轴面北倾的斜歪褶皱、板岩透镜体及一系列断层构造(图2)。

2.3 盆地周缘地质及年龄结构

灵官庙盆地北侧现今主要分布蟒岭花岗岩和新元古代—早古生代宽坪群。蟒岭花岗岩的锆石

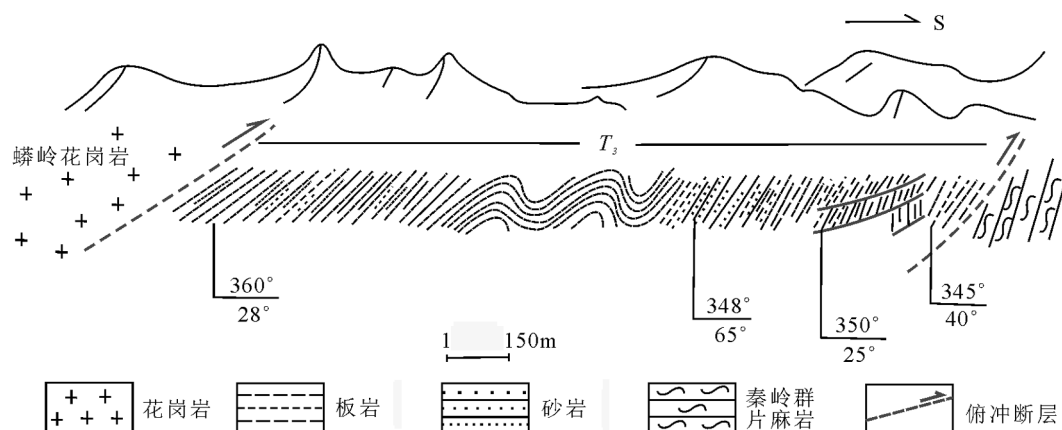


图2 灵官庙盆地地层剖面

Fig. 2 Stratigraphic section of Lingguanmiao basin

U-Pb 年龄为 $149\text{Ma} \pm 2\text{Ma}$, 主体为似斑状二长花岗岩, 另外还有石英闪长岩和钾长花岗岩等^[5-6]。蟒岭花岗岩两侧为宽坪群, 主要由一套变质火山岩—陆源碎屑沉积岩及碳酸盐岩组成, 宽坪群年龄主要为来自云母石英片岩的 U-Pb 峰值年龄 1000Ma ($750 \sim 1200\text{Ma}$), 少数为太古宙年龄值 (10%); 最老为 $3600\text{Ma} \pm 38\text{Ma}$, 年轻者有 $600\text{Ma} \pm 68\text{Ma}$ 、 $689\text{Ma} \pm 59\text{Ma}$ 、 $632\text{Ma} \pm 57\text{Ma}$; 绿片岩年龄为 $943\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$ ^[7]。在研究区蟒岭花岗岩及宽坪群向南逆冲推覆在盆地岩层之上。

盆地南侧主要分布二郎坪群和秦岭群。二郎坪群呈透镜状东西向展布, 主要为一套低绿片岩相—

低角闪岩相浅变质火山—沉积岩系; 陈丹玲等^[8]报道了二郎坪群基性火山岩锆石 U-Pb 年龄为 $463 \sim 475\text{Ma}$, 陆松年等^[9]给出 $466\text{Ma} \pm 7\text{Ma}$ 的 U-Pb 年龄。秦岭群主要由黑云斜长片麻岩、碳酸盐岩和大理岩组成, 夹少量斜长角闪岩。秦岭群的形成时代存在较大分歧, 张宗清等^[10]给出黑云斜长片麻岩碎屑锆石 U-Pb 年龄为 $2172 \sim 2267\text{Ma}$, 斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 同位素等时年龄为 $1987\text{Ma} \pm 49\text{Ma}$; 陆松年等^[11]报道秦岭群副变质岩碎屑锆石 U-Pb 年龄具有 $1500 \sim 1900\text{Ma}$ 峰值; 杨力等^[12]分析丹凤地区秦岭岩群片麻岩岩浆成因锆石 U-Pb 年龄集中在 $1400 \sim 1600\text{Ma}$ 和 $850 \sim 950\text{Ma}$ 。

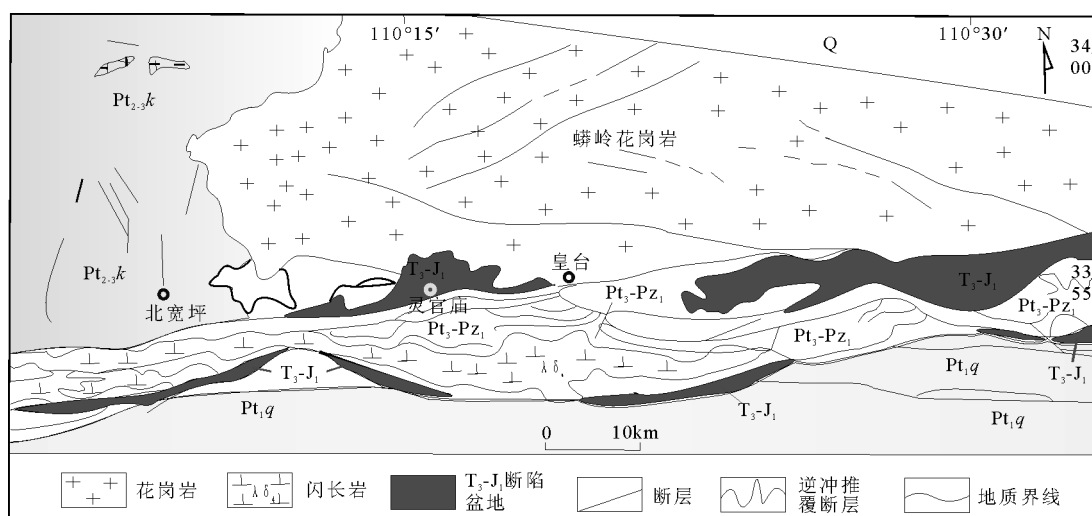


图3 灵官庙盆地及其周缘地质简图(据参考文献[4]修改)

Fig. 3 Geological sketch map of Lingguanmiao basin and its surrounding areas

Q—第四系; $\text{Pt}_3\text{-Pt}_1$ —二郎坪群; $\text{Pt}_2\text{-k}$ —宽坪群; Pt_1q —秦岭群杂岩

3 样品测试方法及结果

3.1 测试方法

砂岩样品在河北省廊坊区域地质矿产调查研究所实验室采用常规方法粉碎后,经淘洗、人工重砂、电磁仪等方法分离锆石。在实体双目镜下根据锆石颜色、形态、自形程度等特征对锆石进行分类,初步了解物源区信息。尽可能挑选出晶形和透明度较好的锆石制靶,打磨、抛光后拍摄锆石反射光和阴极发光(CL)图像,在西北大学大陆动力学国家重点实验室的LA-ICP-MS仪器上用标准测定程序进行锆石U-Pb年龄测定。实验中采用氦作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究研制的人工合成硅酸盐玻璃标准参考物质NIST SRM610进行仪器最佳化,激光采集方式为单点剥蚀。锆石年龄采用标准锆石91500(年龄标称值为1064Ma)作为外标准物质进行校正,每测定6个样品点,加测标样1次。每个分析点的背景采集时间为22s,信号采集时间为40s。以 ^{29}Si 作为内标测定锆石U、Th、Pb的含量,数据处理采用ICPMSDataCal 7.0(中国地质大学(武汉)刘勇胜)程序,锆石U-Pb谐和图及年龄分布直方图的绘制用Isoplot3.00完成。数据处理时,大于1000Ma的锆石,多存在着一定程度的铅丢失,而 ^{207}Pb 和 ^{206}Pb 在相同的初始条件和地质环境中具有同步变化的特征,二者保持相对稳定的比值,因此采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄代表较老锆石的年龄;对于

小于1000Ma的锆石,其 ^{207}Pb 和 ^{235}U 的含量较低,较低的 ^{207}Pb 可能会导致 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 及 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 精度较差,由此计算获得的年龄结果误差较大,因此采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄代表年轻锆石的年龄。详细的实验原理和流程及仪器参数参见袁洪林等^[13]。

3.2 锆石年龄分布特征

样品中的碎屑锆石大多呈无色—浅褐色,半自形短柱状,遭受不同程度的磨圆;少部分呈无色,晶形完好,粒度在60~200 μm 之间。CL图像显示,绝大多数锆石具有岩浆成因特点,发育清晰规则的韵律生长环带,具有不同程度的磨圆;极少数锆石结构复杂,核幔特征明显不同,有的边部还出现亮白色或暗色的增生边,可能为经历过热事件改造的变质锆石。岩浆成因的锆石Th/U值一般高于0.4,而变质成因锆石的Th/U值一般低于0.1^[14-15]。样品中所测锆石Th/U值差异较大,变化于0.03~4.57之间,多数锆石Th/U值大于0.4,显示出岩浆锆石特征。但是也有例外,前人^[16-17]研究表明,快速生长的变质锆石具相对高的Th/U值,样品中含较高Th/U值的可能为变质锆石,还需要根据其他因素加以区分。

根据锆石U-Pb年龄分布直方图(图5),所研究的碎屑锆石年龄结构可分为以下5组。

(1) 426~605Ma: 50颗,占锆石总数的59%,在482Ma出现峰值,大部分Th/U值介于0.37~2.69之间,具有清楚规则的韵律生长环带,为岩浆成因锆石。但LGM-2-18、LGM-2-41和LGM-2-68的

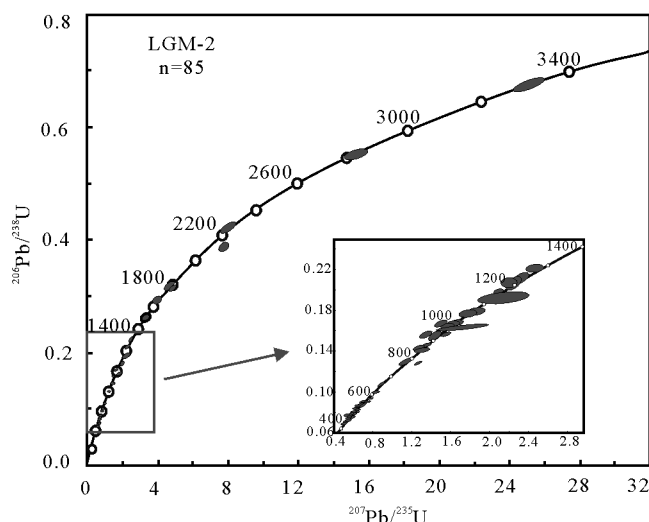


图4 灵官庙盆地碎屑锆石U-Pb谐和图

Fig. 4 U-Pb concordia diagram of detrital zircons from Lingguanmiao basin

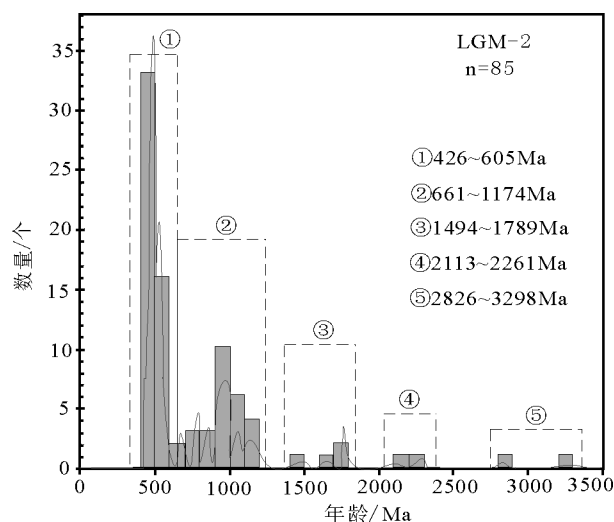


图5 灵官庙盆地碎屑锆石U-Pb年龄分布直方图

Fig. 5 U-Pb age distribution histogram of detrital zircons from Lingguanmiao basin

表1 灵官庙盆地碎屑锆石(LGM-2)U-Th-Pb 同位素数据
Table 1 U-Th-Pb isotopic data of detrital zircons (LGM-2) from Lingguanmiao basin

点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同 位 素 比 值						年 龄 /Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
01	135	552	305	1.81	0.0610	0.0016	1.1169	0.0296	0.1317	0.0016	639	56	762	14	797	9	95
02	62	108	300	0.36	0.0662	0.0018	1.4069	0.0363	0.1530	0.0014	813	56	892	15	918	8	97
03	194	1613	600	2.69	0.0507	0.0015	0.4987	0.0144	0.0707	0.0006	233	67	411	10	441	4	93
04	218	1618	833	1.94	0.0572	0.0014	0.5837	0.0149	0.0735	0.0007	502	56	467	10	457	4	97
05	161	192	138	1.40	0.1312	0.0030	7.5730	0.1819	0.4158	0.0044	2113	40	2182	22	2241	20	97
06	427	356	169	2.10	0.2685	0.0062	25.1820	0.6104	0.6765	0.0076	3298	70	3315	24	3331	29	99
07	271	247	174	1.41	0.1999	0.0045	15.2078	0.3595	0.5487	0.0056	2826	36	2828	23	2820	23	99
08	335	399	272	1.47	0.1427	0.0028	7.6191	0.1644	0.3848	0.0034	2261	34	2187	19	2099	16	95
09	62	137	202	0.68	0.0745	0.0020	1.8210	0.0527	0.1764	0.0015	1057	49	1053	19	1047	8	99
10	30	230	115	2.00	0.0565	0.0031	0.5686	0.0315	0.0739	0.0010	472	124	457	20	459	6	99
11	67	478	334	1.43	0.0569	0.0018	0.5849	0.0208	0.0745	0.0007	487	75	468	13	463	4	99
12	133	725	431	1.68	0.0609	0.0013	0.8298	0.0250	0.0984	0.0008	635	48	614	14	605	5	98
13	34	253	157	1.61	0.0560	0.0025	0.5903	0.0284	0.0761	0.0007	450	100	471	18	473	4	99
14	116	870	465	1.87	0.0567	0.0013	0.5976	0.0170	0.0760	0.0007	480	47	476	11	472	4	99
15	271	514	278	1.85	0.1081	0.0020	4.6837	0.1054	0.3126	0.0029	1769	6	1764	19	1753	14	99
16	28	104	278	0.37	0.0577	0.0019	0.6694	0.0225	0.0839	0.0009	520	68	520	14	520	5	99
17	54	94	212	0.45	0.0751	0.0037	2.1550	0.1767	0.1925	0.0045	1072	99	1167	57	1135	25	97
18	15	7	233	0.03	0.0587	0.0023	0.6949	0.0274	0.0854	0.0011	567	81	536	16	529	7	98
19	157	221	557	0.40	0.0791	0.0020	2.4472	0.0645	0.2231	0.0028	1174	56	1257	19	1298	15	96
20	72	547	206	2.65	0.0568	0.0025	0.6188	0.0266	0.0792	0.0010	483	103	489	17	492	6	99
21	135	1057	231	4.57	0.0584	0.0021	0.6990	0.0263	0.0858	0.0013	546	84	538	16	531	8	98
22	40	278	189	1.47	0.0563	0.0023	0.5941	0.0246	0.0767	0.0011	465	93	473	16	476	7	99
23	141	279	675	0.41	0.0699	0.0016	1.5649	0.0371	0.1602	0.0015	924	48	956	15	958	9	99
25	600	1803	472	3.82	0.0783	0.0019	2.3315	0.0552	0.2129	0.0022	1155	49	1222	17	1244	12	98
27	146	1093	406	2.69	0.0551	0.0019	0.6075	0.0207	0.0794	0.0009	417	75	482	13	493	5	97
28	399	2817	1339	2.10	0.0576	0.0014	0.6214	0.0157	0.0776	0.0011	522	54	491	10	482	7	98
30	47	319	168	1.90	0.0578	0.0024	0.6423	0.0262	0.0805	0.0011	524	93	504	16	499	6	99
31	87	313	115	2.72	0.0713	0.0025	1.6475	0.0599	0.1667	0.0022	966	72	989	23	994	12	99
32	473	1265	2381	0.53	0.0716	0.0013	1.2708	0.0244	0.1275	0.0011	976	37	833	11	774	6	92
33	39	265	157	1.69	0.0562	0.0025	0.6182	0.0282	0.0802	0.0010	461	100	489	18	497	6	98
34	90	653	350	1.86	0.0578	0.0017	0.6386	0.0200	0.0798	0.0009	520	67	501	12	495	5	98
36	417	2301	2077	1.11	0.0594	0.0009	0.7087	0.0145	0.0861	0.0008	589	31	544	9	533	5	97
37	193	1265	650	1.95	0.0599	0.0014	0.7751	0.0195	0.0933	0.0006	598	55	583	11	575	4	98
38	88	658	337	1.96	0.0572	0.0016	0.6477	0.0190	0.0817	0.0008	498	66	507	12	506	5	99
40	202	1360	752	1.81	0.0588	0.0014	0.7359	0.0178	0.0900	0.0009	561	54	560	10	556	5	99
41	36	70	466	0.15	0.0554	0.0016	0.6945	0.0208	0.0899	0.0010	428	69	536	12	555	6	96
43	43	327	183	1.79	0.0575	0.0028	0.6299	0.0305	0.0783	0.0010	509	73	496	19	486	6	97
45	38	287	157	1.82	0.0559	0.0027	0.5952	0.0275	0.0776	0.0012	456	103	474	18	482	7	98
46	44	203	83	2.45	0.0674	0.0033	1.3059	0.0609	0.1405	0.0020	850	102	848	27	847	11	99
47	452	852	487	1.75	0.1015	0.0025	4.4654	0.1042	0.3173	0.0041	1652	46	1725	19	1776	20	97
48	71	478	313	1.52	0.0572	0.0022	0.6194	0.0231	0.0782	0.0008	498	87	489	14	486	5	99
49	95	213	397	0.54	0.0686	0.0020	1.5813	0.0453	0.1657	0.0017	887	59	963	18	988	9	97
50	107	255	445	0.57	0.0681	0.0018	1.5549	0.0435	0.1644	0.0018	870	56	952	17	981	10	97
51	177	1398	809	1.73	0.0551	0.0014	0.5336	0.0149	0.0695	0.0005	417	53	434	10	433	3	99

续表 1

点号	元素含量/ 10^{-6}				同 位 素 比 值						年 龄 /Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
52	159	348	393	0.89	0.0786	0.0015	2.2540	0.0544	0.2069	0.0026	1161	38	1198	17	1212	14	98
54	133	1043	502	2.08	0.0554	0.0014	0.5656	0.0183	0.0733	0.0006	432	56	455	12	456	4	99
56	89	655	323	2.03	0.0562	0.0020	0.6182	0.0238	0.0789	0.0008	461	78	489	15	490	5	99
57	116	199	620	0.32	0.0715	0.0015	1.5580	0.0373	0.1563	0.0012	972	44	954	15	936	7	98
58	256	1778	913	1.95	0.0574	0.0015	0.6938	0.0197	0.0865	0.0009	509	57	535	12	535	5	99
59	55	363	235	1.54	0.0574	0.0025	0.6687	0.0285	0.0843	0.0011	506	101	520	17	522	6	99
60	59	429	296	1.45	0.0557	0.0023	0.6254	0.0260	0.0806	0.0011	443	93	493	16	500	7	98
61	147	834	701	1.19	0.0583	0.0021	0.7085	0.0254	0.0873	0.0011	539	80	544	15	539	6	99
62	93	417	435	0.96	0.0582	0.0019	0.8762	0.0297	0.1080	0.0012	539	72	639	16	661	7	96
63	31	159	177	0.90	0.0572	0.0028	0.6867	0.0324	0.0873	0.0011	502	107	531	20	540	7	98
64	77	604	276	2.19	0.0490	0.0020	0.5218	0.0217	0.0770	0.0008	146	94	426	14	478	5	88
65	116	465	158	2.95	0.0615	0.0021	1.3305	0.0474	0.1570	0.0021	657	72	859	21	940	12	91
66	73	166	366	0.45	0.0651	0.0021	1.2757	0.0430	0.1423	0.0017	777	67	835	19	857	10	97
67	162	492	493	1.00	0.0669	0.0019	1.4365	0.0448	0.1561	0.0017	835	62	904	19	935	10	96
68	40	68	553	0.12	0.0549	0.0018	0.6093	0.0213	0.0804	0.0008	409	76	483	13	499	5	96
69	30	219	151	1.45	0.0550	0.0026	0.5392	0.0247	0.0717	0.0011	413	110	438	16	446	6	98
70	113	364	189	1.93	0.0717	0.0023	1.7555	0.0554	0.1766	0.0019	989	66	1029	20	1048	11	98
71	121	911	484	1.88	0.0570	0.0021	0.5950	0.0211	0.0750	0.0008	500	81	474	13	466	5	98
72	144	368	481	0.76	0.0746	0.0024	1.8685	0.0641	0.1786	0.0027	1058	63	1070	23	1059	15	98
73	202	1304	695	1.88	0.0596	0.0020	0.7485	0.0243	0.0900	0.0009	587	68	567	14	555	5	97
75	85	268	256	1.04	0.0712	0.0020	1.5960	0.0499	0.1607	0.0016	962	58	969	20	961	9	99
76	153	202	263	0.77	0.1087	0.0019	5.0619	0.1190	0.3347	0.0030	1789	31	1830	20	1861	15	98
77	72	558	254	2.20	0.0527	0.0017	0.5581	0.0215	0.0765	0.0008	317	76	450	14	475	5	94
78	75	355	131	2.70	0.0639	0.0022	1.1468	0.0485	0.1300	0.0012	739	74	776	23	788	7	98
79	107	714	609	1.17	0.0549	0.0011	0.5722	0.0170	0.0752	0.0006	409	44	459	11	467	4	98
80	97	661	425	1.56	0.0571	0.0015	0.6268	0.0193	0.0796	0.0008	498	57	494	12	494	5	99
81	333	2319	1035	2.24	0.0580	0.0011	0.6821	0.0170	0.0847	0.0007	532	43	528	10	524	4	99
82	295	870	448	1.94	0.0760	0.0014	2.0784	0.0465	0.1970	0.0019	1095	38	1142	15	1159	10	98
83	140	406	201	2.02	0.0750	0.0021	2.1608	0.0584	0.2087	0.0022	1133	57	1169	19	1222	12	95
84	161	562	420	1.34	0.0668	0.0019	1.3436	0.0348	0.1454	0.0016	831	64	865	15	875	9	98
85	24	141	134	1.05	0.0551	0.0027	0.5858	0.0277	0.0776	0.0010	413	109	468	18	482	6	97
86	202	1363	753	1.81	0.0588	0.0016	0.6365	0.0172	0.0785	0.0008	567	59	500	11	487	5	97
87	160	588	222	2.65	0.0644	0.0019	1.4867	0.0463	0.1679	0.0020	767	58	925	19	1001	11	92
88	111	254	232	1.09	0.0743	0.0066	1.7501	0.1981	0.1624	0.0020	1050	180	1027	73	970	11	94
89	51	352	210	1.68	0.0571	0.0030	0.5370	0.0244	0.0708	0.0012	498	108	436	16	441	7	98
90	92	616	353	1.74	0.0548	0.0019	0.5629	0.0224	0.0755	0.0010	467	80	453	15	469	6	96
92	193	1317	634	2.08	0.0541	0.0021	0.6255	0.0278	0.0842	0.0009	372	87	493	17	521	5	94
93	217	1443	661	2.18	0.0535	0.0017	0.6079	0.0205	0.0831	0.0008	350	70	482	13	515	5	93
94	75	619	310	2.00	0.0535	0.0022	0.4951	0.0191	0.0683	0.0009	350	93	408	13	426	5	95
95	215	371	314	1.18	0.0932	0.0021	3.7476	0.0938	0.2906	0.0031	1494	43	1582	20	1644	16	96
96	153	1109	594	1.87	0.0561	0.0017	0.6054	0.0188	0.0779	0.0010	457	67	481	12	484	6	99

Th/U 值分别为 0.03、0.15 和 0.12, 3 颗锆石的环带不清楚, 核部发光不均一, 最外圈还可见较薄的暗色增生边, 为变质锆石。

(2) 661~1174Ma: 27 颗, 占锆石总数的 32%, 在 958Ma 出现峰值, Th/U 值介于 0.32~3.82 之间, 大部

分锆石具有清楚规则的韵律生长环带, 少数可能由于遭受变质作用结构复杂化。

(3) 1494~1789Ma: 4 颗, 占锆石总数的 5%, 除 LGM-2-15 内部结构较复杂外, 其余锆石具有清楚的韵律生长环带, 为岩浆成因锆石。

(4) $2113\text{Ma} \pm 40\text{Ma}$ 和 $2261\text{Ma} \pm 34\text{Ma}$: 2 颗, 占锆石总数的 2%, LGM-2-05 的 Th/U 值为 1.40, LGM-2-08 的 Th/U 值为 1.47。前者内部颜色均一, 没有结晶分带, 后者可见不规则的结晶环带, 结构复杂。

(5) $2826\text{Ma} \pm 36\text{Ma}$ 和 $3298\text{Ma} \pm 70\text{Ma}$: 2 颗, 占锆石总数的 2%, 锆石结晶环带不完整, 边部有清楚的暗色增生边, 经历了后期热事件的改造。

由此可以看出, 主要的年龄组为 $426 \sim 605\text{Ma}$ 和 $661 \sim 1174\text{Ma}$, 代表主体源区的年龄结构。最年轻的锆石年龄为 $426\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$, 最老的锆石年龄为 $3298\text{Ma} \pm 70\text{Ma}$ 。

4 讨论

4.1 物源区探讨

灵官庙盆地碎屑锆石年龄结构与现今周缘地体的年龄结构的对比结果显示: ① $426 \sim 605\text{Ma}$ 年龄组的 $426 \sim 490\text{Ma}$ 与前述二郎坪群基性火山岩锆石 U-Pb 年龄相对应, 但 $490 \sim 605\text{Ma}$ 缺失对应年龄的地体; ② $661 \sim 1174\text{Ma}$ 年龄组与宽坪群年龄结构(云母石英片岩峰值年龄为 1000Ma ($750 \sim 1200\text{Ma}$), 年轻的年龄有 $600\text{Ma} \pm 68\text{Ma}$ 、 $689\text{Ma} \pm 59\text{Ma}$ 和 $632\text{Ma} \pm 57\text{Ma}$; 绿片岩的年龄为 $943\text{Ma} \pm 6\text{Ma}$) 相似; 另外, 丹凤地区秦岭群片麻岩锆石 U-Pb 年龄含有 $850 \sim 950\text{Ma}$ 年龄段; ③ $1494\text{Ma} \pm 43\text{Ma}$ 与丹凤地区秦岭群片麻岩锆石 U-Pb 年龄 $1400 \sim 1600\text{Ma}$ 对应, $1651 \sim 1789\text{Ma}$ 与秦岭群中副变质岩碎屑锆石年龄 $1500 \sim 1900\text{Ma}$ 相对应; 对于较老年龄 ($2113\text{Ma} \pm 40\text{Ma}$ 和 $2261\text{Ma} \pm 34\text{Ma}$, $2826\text{Ma} \pm 36\text{Ma}$ 和 $3298\text{Ma} \pm 70\text{Ma}$), $2113\text{Ma} \pm 40\text{Ma}$ 和 $2261\text{Ma} \pm 34\text{Ma}$ 与秦岭群黑云斜长片麻岩锆石 U-Pb 年龄 $2172 \sim 2267\text{Ma}$ 相似, 另外 2 颗则与上述宽坪群中太古宙锆石相对应。上述年龄结构对比初步显示, 二郎坪群和宽坪群可能为灵官庙盆地提供大量沉积物, 而秦岭群可能只提供少量沉积物。

考虑到二郎坪群基性火山岩中锆石数量少、颗粒小等特征, 排除 $426 \sim 490\text{Ma}$ (约 30%) 年龄段锆石仅由二郎坪群提供的可能。董云鹏等^[17-18]的研究表明, 二郎坪弧后盆地自 $508\text{Ma} \pm 12\text{Ma}$ 开始向南俯冲, $460\text{Ma} \pm 0.9\text{Ma}$ 关闭, $430 \sim 457\text{Ma}$ 进行弧陆碰撞, 同时伴随商丹带的俯冲造成大量花岗岩侵入^[18-19]。王涛等^[19]分析北秦岭晚奥陶世 (455Ma)—中志留世 (422Ma) 大量花岗岩侵入于秦岭群和二郎坪群

中^[20]。二郎坪弧后盆地俯冲碰撞过程中形成的花岗岩可能为灵官庙盆地的形成奠定一定的物质基础。

灵官庙盆地北侧蟒岭花岗岩 ($149\text{Ma} \pm 2\text{Ma}$) 侵位于晚侏罗世, 晚于盆地形成时代, 不可能为其形成提供沉积物。但蟒岭花岗岩侵位前, 其围岩宽坪群可能大量分布于灵官庙盆地北侧, 为盆地形成提供大量沉积物, 与前述年龄对比观点一致。高山等^[21]研究表明, 宽坪群碎屑岩部分物源来自北侧太华群, 太华群中较老的锆石(样品中 $2826\text{Ma} \pm 36\text{Ma}$ 和 $3298\text{Ma} \pm 70\text{Ma}$) 可能以继承锆石的形式存在于宽坪群中, 而后被带入灵官庙盆地。 $661 \sim 1174\text{Ma}$ 年龄段碎屑锆石反映了 Grenvillian 期岩浆活动对宽坪群物源区的影响。

加里东期侵位于二郎坪群、秦岭群中的花岗岩体可能为盆地提供了大量沉积物, 那么二郎坪群、秦岭群不可避免地为盆地提供少量沉积物。

综上所述, 灵官庙盆地的物源可能主要来自加里东期侵位于二郎坪群、秦岭群中的花岗岩体和新元古代宽坪群, 少量可能来自二郎坪群和秦岭群, 反映了盆地沉积物物源的复杂性和多样性。

4.2 有关锆石年龄的启示

$490 \sim 605\text{Ma}$ 年龄段的锆石缺失对应的年龄地体, 说明现今盆地周缘地体情况与盆地形成时周缘地体情况有所不同。前人^[4]研究显示, 北秦岭在侏罗纪晚期至白垩纪早期发育自北向南的逆冲推覆构造系, 并且研究区燕山期有大规模的岩浆侵位。地质历史中各种地质应力、构造力(如大规模走滑、逆冲推覆、山体隆升剥蚀)等作用可能使盆地周缘部分地体消失。

样品中最年轻的锆石年龄为 $426\text{Ma} \pm 5\text{Ma}$ (中志留世), 而沉积地层化石资料显示灵官庙盆地形成于晚三叠世, 表明源区从中志留世到盆地形成(晚三叠世)期间基本趋于稳定, 没有新的地体形成。前人^[22]研究表明, 燕山期之前秦岭造山带主要构造岩浆热事件发生在新元古代、古生代和早中生代。古生代由于商丹带一线的俯冲碰撞, 北秦岭有大量花岗岩侵入, 王涛等^[20]认为, 古生代花岗岩侵入事件主要发生在晚奥陶世—中志留世 ($422 \sim 455\text{Ma}$); 至早中生代整个秦岭造山带经历了强烈的印支期构造岩浆热事件, 形成巨量早中生代花岗岩体, 但主要出露于南秦岭构造带^[22]。上述资料说明, 北秦

岭中志留世之后到早中生代之前的岩浆活动十分微弱,早中生代虽然发育大量花岗岩体,但主要分布于南秦岭构造带,并不构成灵官庙盆地物源区。

4.3 盆地内变质变形启示

秦岭造山带从主造山期板块俯冲碰撞造山到隆升塌陷,内部的构造动力学机制发生转换调整,标志其已从主造山的统一动力学运行机制开始转向新的陆内大地构造动力学机制^[4],灵官庙盆地正是转换调整阶段的产物。秦岭在侏罗纪晚期—白垩纪早期,广泛发生大范围的陆内构造运动、构造变质变形和以酸性为主的岩浆活动^[4]。前述灵官庙盆地沉积物遭受浅变质形成板岩、千枚岩,片状矿物定向排列;岩层发生广泛构造变形,灰黑色板岩受构造作用形成轴面北倾的斜歪褶皱、板岩透镜体,以及一系列断层构造;盆地北侧出露蟒岭花岗岩并大面积向南推覆于盆地岩层之上,这些现象与北秦岭晚侏罗世广泛构造变质变形一致,表明盆地形成后秦岭造山带发生过强烈的区域性构造运动,且以南北向挤压为主。蟒岭花岗岩的年龄($149\text{Ma} \pm 2\text{Ma}$ ^[5-6])可以限定此次构造运动发生于晚侏罗世之后,据此厘定的时间与前人^[4]所述时间(侏罗纪晚期至白垩纪早期)一致。此分析结果为秦岭造山带在板块构造演化阶段结束后又开始新的以晚侏罗世—早白垩世为峰期的陆内造山作用提供了一定的证据。

5 结 论

(1)北秦岭灵官庙盆地砂岩样品碎屑锆石年龄可以分为5组:426~605Ma、661~1174Ma、1494~1789Ma、2113~2261Ma和2826~3298Ma。其中426~605Ma为主要的年龄组,占59%,其次为661~1174Ma,分别反映了物源区加里东造山期和Grenvillian期岩浆活动的重要影响。通过与现今周缘地体年龄结构对比,结合地质证据分析,灵官庙盆地物源可能主要来自加里东期侵入于二郎坪群、秦岭群中的花岗岩体和新元古代宽坪群,少量可能来自二郎坪群和秦岭群,反映了盆地沉积物物源的复杂性和多样性。

(2)现今盆地周缘地体情况与盆地内沉积物形成时的周缘地体情况略有差别,可能是地质历史中各种地质营力、构造力(如大规模走滑、逆冲推覆、山体隆升剥蚀)等的作用使盆地周缘部分地体消失造成的。

(3)盆地内缺少中志留世—晚三叠世的锆石,说明此期间源区基本趋于稳定,没有新的地体形成,与北秦岭中志留世—早中生代岩浆活动十分微弱观点一致,并且普遍发育的印支期花岗岩体并不构成物源区,侧面反映了盆山耦合关系。

(4)灵官庙盆地正形成于板块造山作用结束后向新的大地构造演化的过渡阶段,是转换调整阶段的产物;盆地内沉积岩的变质变形作用记录了秦岭造山带在板块构造演化阶段结束后又开始了新的以晚侏罗世—早白垩世为峰期的陆内造山作用。

致谢:衷心感谢西北大学大陆动力学国家重点实验室工作人员及谢晋强博士在实验与数据处理过程中提供的帮助。

参考文献

- [1] Bruguier O, Lancelot J R. U-Pb dating on single detrital zircon grains from the Triassic Songpan-Ganze flysch (central China): provenance and tectonic correlations[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1997, 152: 217-231.
- [2] 闫义, 林舸, 李自安. 利用锆石形态、成分组成及年龄分析进行沉积物源区示踪的综合研究[J]. *大地构造与成矿学*, 2003, 27(2): 184-190.
- [3] 张国伟, 张本仁, 袁学成, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 421-726.
- [4] 梁文天. 秦岭造山带东西秦岭交接转换区陆内构造特征与演化过程[D]. 西安: 西北大学博士学位论文, 2009.
- [5] 王晓霞, 王涛, 齐秋菊, 等. 秦岭晚中生代花岗岩时空分布、成因演变及构造意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(6): 1573-1593.
- [6] 秦海鹏, 吴才来, 雷敏, 等. 秦岭造山带蟒岭花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其地质意义[J]. *地质论评*, 2012, 58(4): 783-793.
- [7] 第五春荣, 孙勇, 刘良, 等. 北秦岭宽坪群的解体及新元古 N-MORB[J]. *岩石学报*, 2010, 26(7): 2025-2038.
- [8] 赵姣, 陈丹玲, 谭清海, 等. 北秦岭东段二郎坪群火山岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义[J]. *地学前缘*, 2012, 19(4): 118-125.
- [9] 陆松年, 李怀坤, 陈志宏. 秦岭中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 118-124.
- [10] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994: 1-191.
- [11] 陆松年, 陈志宏, 相振群, 等. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨[J]. *地学前缘*, 2006, 13(6): 303-310.
- [12] 杨力, 陈福坤, 杨一增, 等. 丹凤地区秦岭群片麻岩 U-Pb 锆石年龄: 北秦岭地体中—新元古代岩浆作用和早古生代变质作用记录[J]. *岩石学报*, 2010, 26(5): 1589-1603.
- [13] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. *科学通报*, 2003, 48(14): 1511-1520.

- [14] Belousova E A, Griffin W L, O'Rilly S Y. Igneous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2002, 143: 602–622.
- [15] Hoskin P W O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. Geology, 2002, 28(7): 627–630.
- [16] Whitehouse M J, Kamber B S. On the overabundance of light rare earth elements in terrestrial zircons and its implication for Earth's earliest magmatic differentiation[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 204(3/4): 333–346.
- [17] Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U–Th–Pb microanalysis of amphibole to granulite facies zircon: geochronology of the Ivrea zone (Southern Alps)[J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134(4): 380–404.
- [18] Yunpeng Dong, Guowei Zhang, Franz Neubauer, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 41: 213–237.
- [19] Yunpeng Dong, Guowei Zhang, Xiaoming Liu, et al. Palaeozoic tectonics and evolutionary history of the Qinling orogen: evidence from geochemistry and geochronology of ophiolite and related volcanic rocks[J]. Lithos, 2011, 122: 39–56.
- [20] 王涛, 王晓霞, 田伟, 等. 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[J]. 中国科学(D辑), 2009, 39(7): 949–971.
- [21] 高山, 张本仁, 谷晓明, 等. 秦岭造山带元古宙陆内裂谷作用的沉积地球化学证据[J]. 科学通报, 1990, 35(19): 1494–1496.
- [22] 张成立, 王涛, 王晓霞. 秦岭造山带早中生代花岗岩成因及其构造环境[J]. 高校地质学报, 2008, 14(3): 304–316.
- [23] 张国伟, 孟庆仁, 赖绍聪. 秦岭造山带的结构构造[J]. 中国科学(B辑), 1995, 25(9): 994–1003.
- [24] 张国伟, 郭安林, 姚安平. 关于中国大陆地质与大陆构造基础研究的思考[J]. 自然科学进展, 2006, 16(10): 1210–1215.
- [25] 陈氏悦. 华北地块南部晚古生代至三叠纪沉积构造演化[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 536–540.
- [26] 时毓, 于津海, 徐夕生, 等. 秦岭群造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2651–2670.
- [27] 闫全人, 王宗起, 闫臻, 等. 秦岭群中两类斜长角闪岩的性质和时代及其地质意义[J]. 岩石学报, 2009, 25(9): 2177–2194.
- [28] 李瑞保, 裴先治, 刘战庆, 等. 大巴山及川东北前陆盆地盆山物质耦合——来自 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U–Pb 年代学证据[J]. 地质学报, 2010, 84(8): 1118–1134.
- [29] 第五春荣, 孙勇, 袁洪林, 等. 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[J]. 科学通报, 2008, 53(16): 1923–1934.
- [30] 李亚林, 张国伟, 宋传中, 等. 东秦岭二郎坪弧后盆地双向式俯冲特征[J]. 高校地质学报, 1998, 4(3): 286–293.
- [31] 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 北秦岭构造属性与元古代构造演化[J]. 地球学报, 2003, 24(1): 3–10.
- ① 陕西地质矿产局区域地质调查队 204 分队. 1:20 万商南幅区域地质调查报告. 1988.