

北秦岭柳叶河盆地上三叠统物源区及其 与鄂尔多斯盆地的关系 ——来自碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄的证据

李侃, 郭安林, 高春云, 李兴辉

LI Kan, GUO Anlin, GAO Chunyun, Li Xinghui

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:对陕西省周至地区北秦岭晚古生代—中生代柳叶河盆地上三叠统石英砂岩进行单颗粒锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析。以岩浆锆石为主的 77 个测试点给出的年龄值形成 7 个年龄组: 256~475Ma、1500~1680Ma、1750~2190Ma、2190~2310Ma、2400~2650Ma、2700~2800Ma 和 2850~2960Ma。其中最年轻的锆石年龄为 256 ± 4 Ma, 最老的锆石年龄是 2954 ± 25 Ma。峰值年龄以 1750~2190Ma 古元古代年龄组为代表 (占总测点的 64%)。将柳叶河盆地上三叠统与石炭系碎屑锆石年龄结构进行对比, 前者新元古代年龄结构缺失, 表明晚古生代介于柳叶河与鄂尔多斯盆地间的北秦岭北部具新元古代年龄结构的古陆, 晚三叠世相对沉降, 成为盆地次要物源区。结合与周缘地体年龄结构对比, 北秦岭南部二郎坪群、秦岭群、丹凤群、南缘的沉积楔形体刘岭群及北秦岭与加里东期活动陆缘沟-弧-盆体系相关的岩浆作用产物此时则成为盆地主要物源区。北秦岭内部北降南升。柳叶河盆地上三叠统碎屑锆石与鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组砂岩碎屑锆石较好的可对比性, 以及柳叶河盆地北侧源区 (北秦岭北部) 的构造变动、化石等证据表明, 柳叶河盆地与鄂尔多斯盆地在晚三叠世很有可能连通, 柳叶河盆地可能代表鄂尔多斯盆地的南部边缘。

关键词: 柳叶河盆地; 晚三叠世; 碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年; 物源区; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: P534.51; P597^{+.3}

文献标志码: A

文章编号: 1671-2552(2015)08-1426-12

Li K, Guo A L, Gao C Y, Li X H. A tentative discussion on the source area of the Late Triassic Liuyehe basin in North Qinling Mountains and its relationship with the Ordos basin: Evidence from LA-ICP-MS U-Pb dating of detrital zircons. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(8):1426-1437

Abstract: In this paper, the authors collected quartz sandstone samples from late Triassic Liuyehe basin of North Qinling Mountains in Zhouzhi area, Shaanxi Province, and conducted LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb isotope analysis. The results show that the 77 analytical points of the magmatic detrital zircons yielded seven age groups: 256~475Ma, 1500~1680Ma, 1750~2190Ma, 2190~2310Ma, 2400~2650Ma, 2700~2800Ma, and 2850~2960Ma. Among the ages, the youngest age is 256 ± 4 Ma, whereas the oldest age is 2954 ± 25 Ma; the major Paleoproterozoic age group (1750~2190Ma) accounts for 64% of the total measured points. The zircon age comparison between the Carboniferous Liuyehe basin and the late Triassic Liuyehe basin shows that the Neoproterozoic age is lacking in the Late Triassic Liuyehe basin, which indicates that the uplifting northern part in EW-trending North Qinling Mountains located between Liuyehe basin and Ordos basin during the Carboniferous was removed in Late Triassic and became the secondary provenance of Liuyehe basin. A comparative study of the age structure of the peripheral terranes shows that the southern part of North Qin-

收稿日期: 2014-09-18; 修订日期: 2015-03-19

资助项目: 国家基础科学人才培养基金项目 (编号: XDCX2012-07)、中国地质调查局项目 (编号: 12120113047600)、西北大学大陆动力学国家重点实验室科技部专项 (编号: YPH0800)

作者简介: 李侃 (1992-), 男, 在读本科生, 地质学专业。E-mail: 920215443@qq.com

ling Mountains, including the Erlangping, Qinling, Danfeng and Liuling groups as well as the magmatic material developed in the Caledonian trench-arc-basin system along the Shangdan suture zone, became the major provenance for the basin. Combined with the paleontologic evidence, the similarity in detrital zircon age distribution pattern between the Triassic Liuyehe basin and the Yan-chang formation in southwest Ordos basin strongly suggests that the Liuyehe basin was probably connected with the southern Ordos basin and represented the southern margin of the Ordos basin during the Late Triassic.

Key words: Liuyehe basin; Late Triassic; detrital zircon LA-ICP-MS U-Pb dating; provenance; Ordos basin

秦岭造山带经历长期的多期次构造演化,属于典型的大陆复合型造山带^[1]。造山带内发育的沉积盆地与造山带在空间上相互依存,物质上相互转换,并统一于地球深部动力学机制,组成了一个相互联系且不可分割的盆山系统^[2-3]。从盆地的形成发展中揭示造山过程、从造山带的演变中探索盆地形成,势必更加有效地探索大陆造山带与沉积盆地之间的相互耦合关系。利用同位素定年方法示踪沉积物源区对于反演源区构造演化具有独特的优势^[4]。笔者对北秦岭周至境内柳叶河中生代断陷盆地中的沉积岩进行了碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年研究,目的在于:①结合(对比)潜在源区构造变迁年代学信息与周缘地体出露情况,界定物源区^[5-8],以更全面地解析源区信息,为盆山物质耦合研究提供更丰富的年龄信息;②推断秦岭在构造体制由中生代早期板块体制向中生代中晚期陆内构造体制转换时期的地体组成情况及之后的源区构造变迁,并进一步探讨其原因。前人未对秦岭中生代断陷盆地内部碎屑锆石进行过系统的同位素地质年代学研究,因此,本次对柳叶河盆地的碎屑锆石年代学研究具有重要意义。

秦岭造山带呈现“两带三块”(商丹缝合带、勉略缝合带,华北地块南缘、南秦岭即原“秦岭微板块”和扬子地块北缘)的基本构造格架^[9]。秦岭经过太古宙一元古宙早期裂谷和小洋盆的发育及新元古代—中生代初期秦岭古特提斯洋的漫长发展演化后,于早中生代印支期扬子板块沿南侧的勉略带向华北由东向西穿时俯冲碰撞,最终完成了与华北板块的缝合。秦岭继印支期主碰撞之后,进入以发育后碰撞花岗岩及三叠纪—侏罗纪伸展构造断陷盆地为特征的后碰撞造山作用阶段,多数研究者将其与造山带垮塌相联系^[10-11]。这不仅表明印支期碰撞造山活动的结束,并且标志着秦岭板块造山作用的终结。印支期板块碰撞作用结束后,秦岭于中生代中晚期进入以逆冲推覆构造变形和花岗岩岩浆作用为特征的陆内造山作用阶段,同时引起晚三叠

世—早中侏罗世(T_3-J_{1-2})伸展断陷盆地内部地层的变形变质作用^[12]。北秦岭柳叶河伸展断陷盆地形成于秦岭造山带中生代早期板块构造体制向中生代中晚期陆内构造体制过渡时期,该盆地沉积岩碎屑锆石年龄结构的研究,对于推断构造体制转换时期北秦岭造山带的地体组成情况具有重要意义。

1 区域地质背景

1.1 北秦岭区域地质概况

柳叶河盆地位于秦岭造山带北秦岭地区。北秦岭指秦岭商丹断裂带与洛南—栾川—方城断裂带之间的秦岭北部区域,物质组成和构造演化具多样性和多期性。带内由南向北依次为:丹凤群,属于早古生代^[13]洋内岛弧构造环境^[14];松树沟蛇绿岩片;最古老的前寒武纪结晶基底秦岭群;早古生代二郎坪群^[15],由大庙岩片、小寨岩片和二郎坪蛇绿岩片3个岩石组合及变质变形特征不同的构造岩片叠置而成^[16],北侧以黄台—瓦穴子断裂与宽坪群相邻;由多个构造岩片堆叠成的中新元古代(Pt_{2-3})^[17]构造—岩石—地层组合体^[18];宽坪群,各岩群之间均以大型剪切带和断裂为界,相互逆冲叠置而成^[16],呈北西西向平行展布,构成北秦岭造山带主体^[1]。2000Ma左右北秦岭属于华北陆块外侧洋岛的独立微陆块;1600Ma左右北秦岭古洋盆向华北陆块俯冲消减,北秦岭首次拼接于华北陆块;1300Ma开始扩张裂解,形成宽坪小洋盆;于1000Ma消减闭合,北秦岭块体与华北块体再次对接。北秦岭地区在演化过程中经历过古元古代(2.2~1.8Ga)及中元古代(1.4~0.9Ga)两次主要的地壳增生事件^[16],伴随岩浆作用事件。北秦岭现今的构造格架,在前寒武纪演化基底上,以秦岭板块构造的华北板块南缘活动大陆边缘的沟、弧、盆演化为基础,经历俯冲碰撞变质变形造山作用,后又叠加中、新生代陆内造山作用,造成沿主干断裂发生自北向南为主的高角度叠瓦逆冲推覆,成为现今的北秦岭厚皮叠瓦逆冲推覆构造系。

北秦岭带内局部断续残留强变形、未变质或弱变质的三叠系、侏罗系、白垩系,其反映的沉积环境和构造背景对于确定秦岭印支主造山期之后的构造演化,恢复中生代原型盆地等具有重要的大地构造意义,因此,对于北秦岭中生代断陷盆地内沉积地层的研究意义重大。

1.2 北秦岭中生代断陷盆地地质概况

秦岭众多的中生代断陷盆地主要发育在北秦岭地区。根据盆地沉积地层化石研究,这些断陷盆地主要形成于晚三叠世—早中侏罗世期间,属于商丹带北部沿主断裂发育的断陷盆地。盆地多呈东西向延伸,西起陕西商南地区,东延伸至河南境内,长达几十千米,宽窄不一,最宽处可达4~5km(图1)。野外构造产状表明,这些盆地角度不整合于印支期碰撞造山冲断褶皱基底之上。沿商丹带和勉略带前期板块缝合带及其旁侧的宁陕沙沟、镇坪白

湾、后老庙、火麦地、炭和里、勉县、郎木寺、紫阳瓦房店等地发育串珠状山间红色盆地,造山带挤压收缩最强烈地段的东、西秦岭交界区断裂构造发育,盆地分布也最为密集,如江洛、高桥、茨坝、龙家沟、王家坝等十余个盆地。这些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^[19]。

柳叶河盆地位于陕西周至县内,312国道柳叶河附近。该盆地属于长期、多时代(石炭纪、二叠纪和三叠纪)发育的叠加盆地^①。盆地内地层自北向南依次为上石炭统、中上二叠统、上三叠统。石炭系下部为块状杂砾岩,砾石主要为白云岩、石英岩、变粒岩、大理岩等,向上逐渐变化为砾岩层和含砾粗砂岩,石炭系逆冲于南侧二叠系之上;二叠系主要为紫红色含砾泥岩、泥岩夹厚层状砂岩、含炭砂质泥岩;上三叠统下部主要为灰白色厚层状石英细

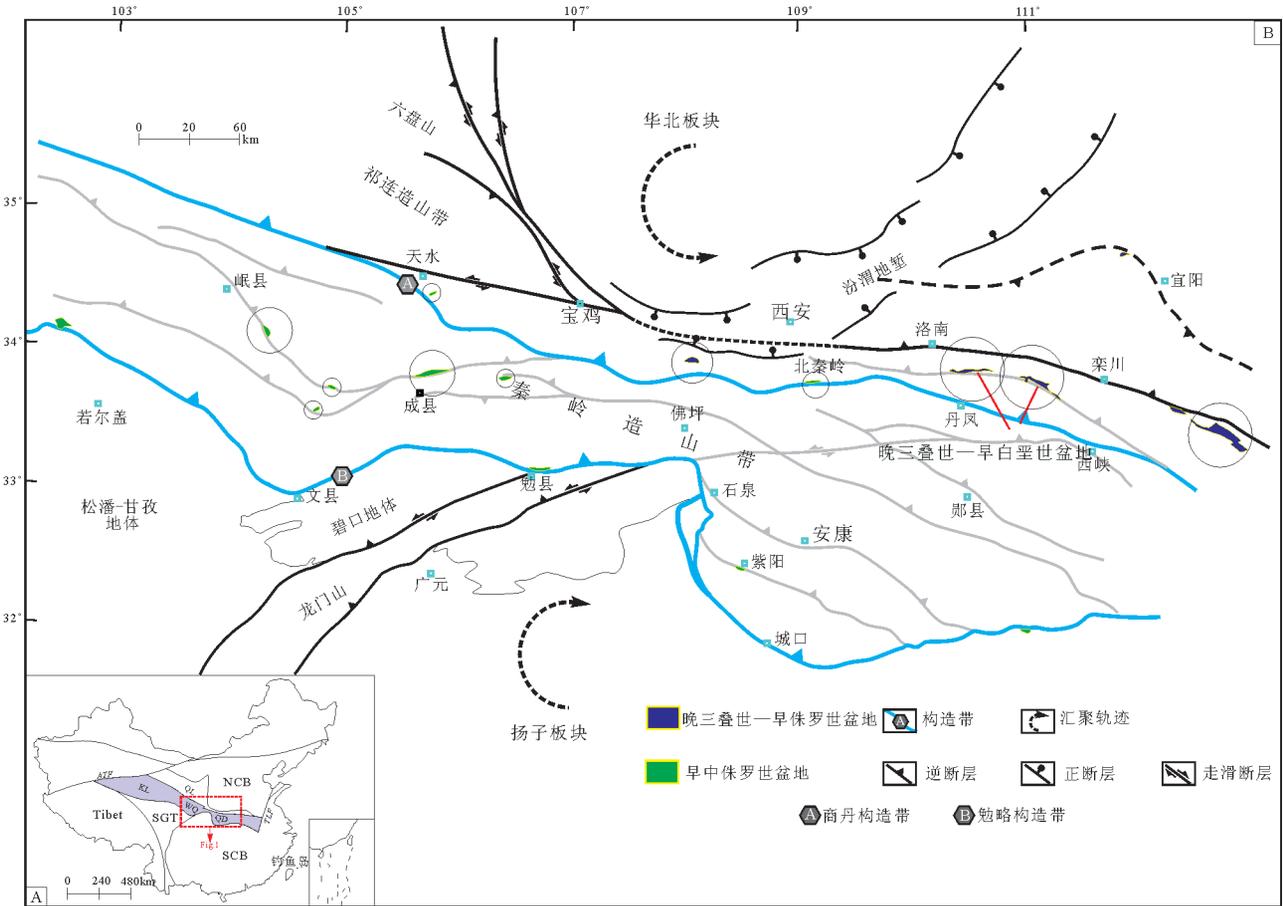


图1 秦岭现今构造格局及上三叠统一下侏罗统盆地分布图(据参考文献[19]修改)

Fig. 1 Present structure of the Qinling Mountains and distribution of T₃-J₁ basin
 NCB—华北板块;SCB—华南板块;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

砾岩、砂砾岩、长石石英砂岩和泥砂质板岩,上部则为含炭泥、砂质板岩与中细粒石英砂岩、长石石英砂岩互层。盆地内部沉积岩层产状陡立,主体向南倾斜,显示盆地沉积岩层遭受了自北而南的逆冲推覆构造。

1.3 柳叶河盆地周缘地体地质概况及其锆石年龄结构

柳叶河盆地及其周缘地质图(图2)显示,现今盆地北部出露宽坪群,主要由绿片岩-斜长角闪岩类、云母石英片岩-片麻岩类和大理岩组成^[16],与柳叶河盆地以断层接触。

南部依次为云架山群(相当于二郎坪群)、秦岭群、丹凤群,更南侧为南秦岭北带泥盆纪刘岭群。秦岭群由一套浅变质的基性火山岩^[20]及副变质岩组成,丹凤群主体为一套变基性火山岩,刘岭群主要为浅变质沉积岩。此外,古生代时期商丹沿商丹

带向北俯冲,扬子北缘与北秦岭的碰撞,引发大量花岗岩的侵位^[21-22],侵位于北秦岭的东部和中部地段的秦岭群、二郎坪群和丹凤群^[23]。各岩群主要年龄结构见表1。

2 样品采集、测试方法及定年结果

2.1 取样剖面及样品特征

用于锆石U-Pb同位素测定的样品(LYH-05)为中细粒石英砂岩,采自陕西省周至县312国道柳叶河段上三叠统(图3、图4),地理坐标为N33°58'48.6"、E108°09'56.6"。

2.2 样品测试方法

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。在双目镜下根据锆石颜色、形态、自形程度等特征对锆石进行统计分类,

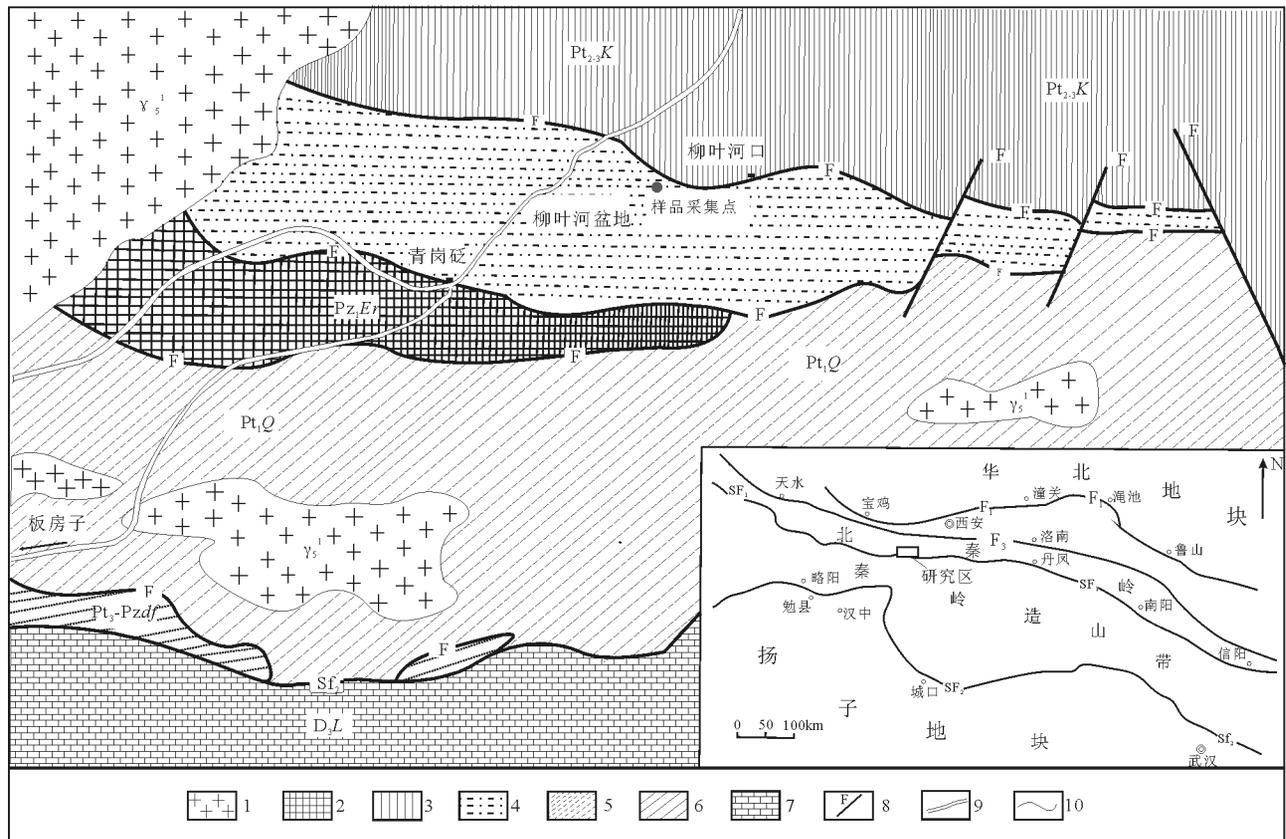


图2 柳叶河盆地及周缘地体地质图(据参考文献②修改)

Fig. 2 Geological map of Liuyehe basin and its peripheral terranes

- 1—燕山期花岗岩体(γ^1_s); 2—二郎坪群(Pz,Er); 3—宽坪群(Pt₃,K); 4—柳叶河盆地; 5—秦岭群(Pt₁,Q);
- 6—丹凤群(Pt₃-Pzdf); 7—刘岭群(D,L); 8—断层; 9—公路; 10—岩层界线; SF₁—商丹缝合带;
- SF₂—勉略缝合带; F₁—秦岭北界逆冲断层; F₃—洛南—栾川逆冲推覆断层

表1 柳叶河盆地周缘地体年龄结构
Table 1 Age structure of peripheral terranes of Liuyehe basin

方位	岩群	岩性	年龄	方法	出处
盆地 北侧	宽坪群	石英云母片岩	峰值年龄1000Ma左右,年轻者600±68Ma, 632±57Ma, 689±59Ma	锆石 U-Pb	第五春荣等 ^[24]
		绿片岩	1153~943Ma	锆石 U-Pb	
		绿片岩	少量古元古代晚期及中新太古代年龄(2400~2900Ma)	锆石 U-Pb	
盆地 南侧	二郎坪群	基性火山岩	463~475Ma	锆石 U-Pb	赵姣等 ^[25]
			466±7Ma	锆石 U-Pb	陆松年等 ^[26]
	秦岭群	花岗质正片麻岩	890~980Ma	锆石 U-Pb	扬力等 ^[27]
		副变质岩	1500~1900Ma	锆石 U-Pb	陆松年等 ^[26]
		副变质岩	少量古元古代晚期及中新太古代年龄(2300~2800Ma)	锆石 U-Pb	陆松年等 ^[26]
		斜长角闪岩	263±2Ma, 312Ma, 362Ma, 380Ma, 386Ma	矿物 Rb-Sr	张宗清等 ^[17]
		黑云斜长片麻岩	2226+173/-153Ma, 2172±5Ma	锆石 U-Pb	张宗清等 ^[17]
	斜长角闪岩	1987±49Ma	全岩 Sm-Nd	张宗清等 ^[17]	
	丹凤群	变基性火山岩	330~520Ma	锆石 U-Pb	闫臻等 ^[28]
	刘岭群	沉积岩碎屑锆石	400~500Ma	锆石 U-Pb	陈龙耀等 ^[29]
800~1100Ma			锆石 U-Pb		
	侵位于秦岭群、二郎坪群和丹凤群的花岗岩体	花岗岩	415~400 Ma, 455~422Ma, 505~470Ma	锆石 U-Pb	王涛 ^[21]

初步了解物源区信息。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、透射光和阴极发光(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。实验中采用氦气作为剥蚀物质的载气,用美国国家标准技术研究所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。用标准锆石91500作外标校正锆石U-Pb同位素分馏,每测定6个样品点,加测标样一次。每个分析点的背景采集时间为22s,信号采集时间为40s。以²⁹Si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,加权平均计算及U-Pb谐和图、年龄直方图等的绘图采用Isoplot 3.00软件完成^[30]。样品分析过程中91500标样的分析结果为1063±15Ma($n=28, 1\sigma$), GJ-1标样的分析结果为611±32Ma($n=6, 1\sigma$)。大于1000Ma的数据,采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb年龄,小于1000Ma的数据,采用²⁰⁶Pb/²³⁸U年龄^[31]。详细的实验原理和流程及仪器参数

参见参考文献[32]。所测得的锆石年龄数据见表2。

2.3 碎屑锆石形貌学特征及U-Pb同位素测定结果

2.3.1 碎屑锆石形态学特征

从LYH-5中细粒石英砂岩中选出的锆石一般呈无色透明,少数呈浅黄色透明,大多数为短柱状,锆石粒度90~110 μm,部分保持较好的长柱状晶形,粒度为180 μm,表明经历短距离搬运。其中也有磨圆锆石颗粒,锆石粒度25~60 μm,呈圆状-次圆状,指示其经历了长距离的搬运过程。锆石U-Pb同位素分析结果见表2和图5。

本文所研究样品测点数目为91个,其中14个测点由于测得的年龄谐和度低未被采用,最终用于年龄数据的为77个。绝大多数锆石具有岩浆成因锆石的特点,发育清晰规则的韵律生长环带;少数锆石结构复杂,核幔特征明显不同,核部发光不均一,有的边部还出现亮白色或暗色增生边,可能经历了不止一次热事件的改造,为变质锆石。另外岩浆结晶的锆石,其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^[33-34]。样品中选用的



图3 柳叶河盆地及砂岩样品 LYH-05 野外照片
Fig. 3 The field photographs of the outcrop in Liuyehe basin and LYH-05 sandstone sample

锆石 Th/U 值多数大于 0.4, 仅 4 颗锆石的 Th/U 值小于 0.1, 可能为变质成因, 说明样品中锆石多为岩浆成因。

2.3.2 碎屑锆石 U-Pb 年龄谱特征

根据获得的 U-Pb 锆石年龄的频谱分布(图 6) 可以看出, 所采用的 77 个年龄值形成 7 个年龄组: ①266~475Ma 年龄组, 共 15 颗锆石, 大部分 Th/U 值介于 0.22~0.68 之间, 具有清晰规则的韵律生长环带, 为岩浆成因的锆石。②1500~1680Ma 年龄组, 共 4 颗锆石, Th/U 值为 0.43 左右。③1750~2190Ma 年龄组, 共 48 颗锆石, Th/U 值介于 0.12~0.73 之间。

④2190~2310Ma 年龄组, 共 4 颗锆石, Th/U 值介于 0.15~0.53 之间, 但样品 LYH-5-59 的 Th/U 值为 2.98, 锆石不具有韵律环带, 且发光不均匀, 可能为变质锆石, 其余则为岩浆锆石。⑤2400~2650Ma 年龄组, 共 4 颗锆石, Th/U 值在 0.70 左右, 均具有韵律环带, 为岩浆锆石。⑥2700~2800Ma 年龄组, 共 1 颗锆石, Th/U 值为 0.02, 无明显韵律环带, 可能为变质锆石。⑦2850~2960Ma 年龄组, 共 1 颗锆石, Th/U 值为 0.50, 具有韵律环带, 为岩浆锆石。

其中 1750~2190Ma 年龄组为明显峰值, 其次为 256~475Ma 年龄组, 该组内 266~316Ma 区间年龄占

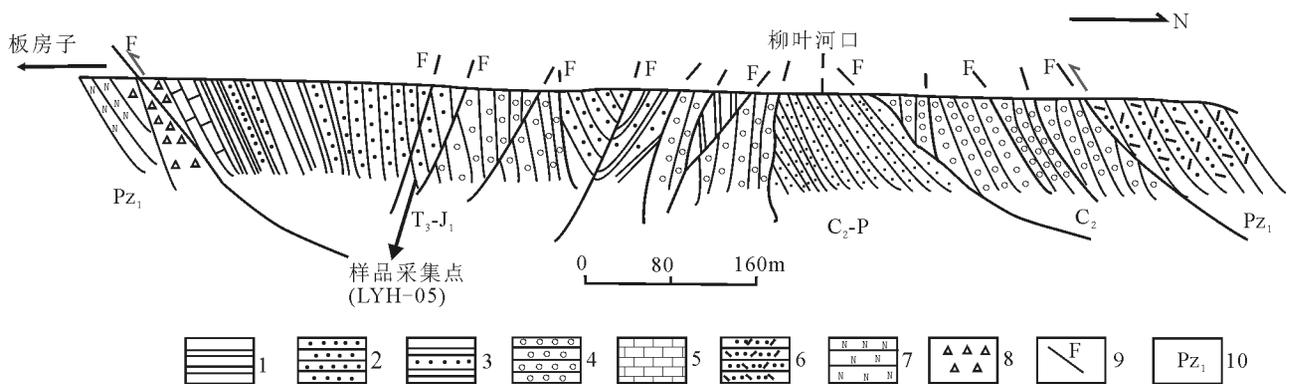


图4 柳叶河盆地地层剖面(据参考文献③修改)

Fig. 4 Stratigraphic section of Liuyehe basin

- 1—含炭砂质板岩; 2—长石石英砂岩; 3—紫红色含砾板岩; 4—砾岩; 5—灰岩;
- 6—片理化凝灰质粉砂千枚岩; 7—黑云母斜长变粒岩; 8—泥炭化断层角砾岩;
- 9—断层(F); 10—二郎坪群(Pz₁); T₃-J₁—晚三叠世-早白垩世砾岩地层;
- C₂-P—晚石炭世-二叠纪砂岩地层; C₂—晚石炭世砾岩地层

表2 柳叶河盆地碎屑锆石LA-ICP-MS U-Th-Pb同位素数据
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotopic data of detrital zircons from Liuyehe basin

分析 点号	元素含量/ 10^{-6}			Th/U	同位素比值					同位素年龄 /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	169	74	462	0.16	0.1151	0.0055	4.9670	0.1261	0.3207	0.0051	1883	85	1814	21	1793	25	105
02	68	108	168	0.64	0.1088	0.0026	4.9026	0.1188	0.3254	0.0041	1788	43	1803	20	1816	20	99
03	166	92	387	0.24	0.1272	0.0028	6.5594	0.1824	0.3705	0.0053	2059	39	2054	25	2032	25	101
04	162	53	447	0.12	0.1111	0.0027	5.0194	0.1312	0.3258	0.0039	1818	42	1823	22	1818	19	100
05	139	162	341	0.47	0.1129	0.0031	5.1387	0.1444	0.3293	0.0038	1856	50	1843	24	1835	18	101
06	275	213	704	0.30	0.1133	0.0029	5.2565	0.1434	0.3351	0.0042	1854	47	1862	23	1863	20	99
07	375	11	596	0.02	0.1936	0.0042	14.5620	0.4126	0.5391	0.0073	2773	36	2787	27	2780	31	100
08	144	115	291	0.39	0.1369	0.0025	7.7210	0.1761	0.4062	0.0042	2188	27	2199	21	2198	19	100
09	73	50	100	0.50	0.2164	0.0034	17.3704	0.4317	0.5772	0.0076	2954	25	2956	24	2937	31	101
10	15	75	192	0.39	0.0559	0.0024	0.5145	0.0247	0.0664	0.0008	456	98	421	17	414	5	102
11	98	58	340	0.17	0.1118	0.0018	4.0347	0.1077	0.2586	0.0020	1829	29	1641	22	1482	10	109
12	29	334	498	0.67	0.0504	0.0018	0.3276	0.0134	0.0464	0.0004	217	83	288	10	293	3	98
13	129	46	335	0.14	0.1146	0.0019	5.5446	0.1259	0.3467	0.0031	1874	30	1908	20	1919	15	98
14	92	82	221	0.37	0.1165	0.0024	5.6922	0.1323	0.3507	0.0036	1903	36	1930	20	1938	17	98
15	93	73	226	0.32	0.1153	0.0028	5.6848	0.1445	0.3550	0.0044	1884	44	1929	22	1958	21	96
16	56	91	125	0.73	0.1124	0.0033	5.3644	0.1570	0.3431	0.0041	1839	52	1879	25	1901	20	97
17	628	797	1536	0.52	0.1168	0.0027	5.3783	0.1282	0.3305	0.0037	1909	41	1881	20	1841	18	104
18	39	45	60	0.75	0.1663	0.0045	11.1276	0.3058	0.4805	0.0053	2521	46	2534	26	2529	23	100
19	211	19	742	0.03	0.0937	0.0023	3.4339	0.0794	0.2633	0.0024	1502	46	1512	18	1507	12	100
20	28	187	476	0.39	0.0549	0.0018	0.3837	0.0124	0.0502	0.0005	409	76	330	9	316	3	104
21	89	74	224	0.33	0.1153	0.0035	5.3467	0.1599	0.3326	0.0041	1885	55	1876	26	1851	20	102
22	113	106	295	0.36	0.1150	0.0031	5.2710	0.1387	0.3293	0.0042	1880	48	1864	22	1835	21	102
23	93	67	266	0.25	0.1175	0.0058	5.0261	0.1454	0.3153	0.0047	1918	89	1824	25	1767	23	109
24	198	83	531	0.16	0.1253	0.0119	5.9288	0.1833	0.3672	0.0079	2033	16	1965	27	2016	37	101
25	112	51	275	0.19	0.1136	0.0029	6.1302	0.1531	0.3878	0.0040	1858	45	1995	22	2112	19	88
26	124	132	350	0.38	0.1099	0.0029	5.1260	0.1372	0.3348	0.0037	1798	53	1840	23	1862	18	97
27	7	101	113	0.89	0.0555	0.0115	0.3538	0.0923	0.0464	0.0007	435	40	308	69	292	4	105
28	156	113	411	0.28	0.1099	0.0049	5.3802	0.7266	0.3418	0.0046	1798	81	1882	34	1895	22	95
29	119	184	288	0.64	0.1108	0.0035	5.4828	0.4401	0.3510	0.0050	1813	57	1898	69	1939	24	93
30	24	200	271	0.74	0.0556	0.0026	0.5976	0.0333	0.0764	0.0010	435	13	476	21	475	6	100
31	293	225	636	0.35	0.1258	0.0050	7.2533	0.2261	0.4148	0.0058	2040	70	2143	28	2237	26	91
32	195	232	507	0.46	0.1185	0.0034	5.5429	0.1455	0.3346	0.0044	1933	52	1907	23	1861	21	104
33	191	30	543	0.06	0.1222	0.0039	5.6847	0.1680	0.3332	0.0037	1991	56	1929	26	1854	18	107
34	103	43	284	0.15	0.1372	0.0173	5.6748	0.1513	0.3332	0.0065	2192	22	1928	23	1854	31	118
35	117	77	306	0.25	0.1204	0.0027	5.7256	0.1296	0.3417	0.0041	1962	40	1935	20	1895	20	104
36	150	70	306	0.23	0.1469	0.0034	8.5430	0.2116	0.4186	0.0058	2310	40	2291	23	2254	26	102
37	26	254	425	0.60	0.0563	0.0027	0.4055	0.0205	0.0522	0.0008	465	10	346	15	328	5	105
38	62	39	166	0.23	0.1107	0.0025	5.0358	0.1223	0.3293	0.0038	1811	40	1825	21	1835	18	99
39	106	68	282	0.24	0.1108	0.0022	5.0480	0.1114	0.3300	0.0035	1813	36	1827	19	1839	17	99
40	237	289	414	0.70	0.1588	0.0021	9.7815	0.2052	0.4448	0.0050	2443	23	2414	19	2372	22	103
41	197	97	525	0.18	0.1136	0.0022	5.2554	0.1242	0.3348	0.0027	1858	29	1862	20	1861	13	100
42	17	54	244	0.22	0.0561	0.0019	0.5032	0.0190	0.0650	0.0006	457	69	414	13	406	4	102
43	181	209	452	0.46	0.1095	0.0011	5.0760	0.0966	0.3352	0.0025	1790	19	1832	16	1864	12	96
44	170	71	473	0.15	0.1078	0.0015	4.8198	0.0951	0.3230	0.0029	1763	26	1788	17	1805	14	98
45	122	41	334	0.12	0.1094	0.0020	5.0121	0.1102	0.3305	0.0031	1791	33	1821	19	1841	15	97
46	194	75	534	0.14	0.1081	0.0022	4.8763	0.1044	0.3253	0.0028	1768	37	1798	18	1816	13	97

续表 2

分析 点号	元素含量/ 10^6			Th/U	同位素比值						同位素年龄 /Ma						谐和度 /%
	Pb	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	
47	33	120	40	2.98	0.1379	0.0044	7.9535	0.2456	0.4179	0.0049	2211	56	2226	28	2251	22	97
48	230	70	590	0.12	0.1117	0.0029	5.2448	0.1380	0.3380	0.0036	1828	47	1860	22	1877	17	99
49	566	67	1508	0.04	0.1112	0.0028	5.1993	0.1394	0.3361	0.0039	1820	47	1853	23	1868	19	99
50	25	29	50	0.57	0.1293	0.0041	6.9647	0.2255	0.3894	0.0059	2089	56	2107	29	2120	27	100
51	76	74	138	0.53	0.1431	0.0034	8.3917	0.1947	0.4232	0.0044	2265	36	2274	21	2275	20	99
52	133	48	350	0.14	0.1112	0.0024	5.1001	0.1132	0.3304	0.0031	1820	35	1836	19	1841	15	101
53	178	107	390	0.28	0.1365	0.0035	7.7448	0.3251	0.3996	0.0092	2184	44	2202	38	2167	42	99
54	106	125	262	0.48	0.1109	0.0026	5.0362	0.1210	0.3276	0.0037	1815	43	1825	20	1827	18	101
55	113	38	309	0.12	0.1131	0.0028	5.1195	0.1249	0.3271	0.0033	1850	44	1839	21	1824	16	104
56	43	232	697	0.33	0.0538	0.0016	0.4163	0.0120	0.0560	0.0006	365	65	353	9	351	4	101
57	87	115	215	0.53	0.1232	0.0032	5.9739	0.1929	0.3482	0.0055	2003	41	1972	28	1926	26	104
58	103	52	298	0.17	0.1160	0.0028	5.1603	0.1248	0.3222	0.0040	1896	44	1846	21	1800	19	105
59	76	311	1086	0.29	0.0594	0.0017	0.5599	0.0170	0.0680	0.0008	589	63	451	11	424	5	106
60	35	424	628	0.68	0.0527	0.0017	0.3570	0.0121	0.0490	0.0005	322	74	310	9	309	3	99
61	18	151	275	0.55	0.0535	0.0022	0.4394	0.0192	0.0598	0.0007	350	91	370	14	374	4	104
62	46	46	122	0.38	0.1181	0.0090	5.1929	0.2571	0.3330	0.0051	1929	13	1851	42	1853	25	97
63	78	141	181	0.78	0.1027	0.0019	4.9417	0.1908	0.3497	0.0032	1673	33	1809	33	1933	16	95
64	75	86	193	0.45	0.1027	0.0023	4.7368	0.2357	0.3358	0.0035	1676	42	1774	42	1867	17	93
65	26	160	528	0.30	0.0483	0.0015	0.3034	0.0196	0.0457	0.0004	122	76	269	15	288	3	94
66	273	297	714	0.42	0.0988	0.0010	4.5055	0.2211	0.3313	0.0030	1602	19	1732	41	1845	15	98
67	152	133	392	0.34	0.1110	0.0056	4.9919	0.2415	0.3329	0.0039	1817	92	1818	41	1852	19	98
68	38	378	562	0.67	0.0521	0.0016	0.4030	0.0171	0.0559	0.0005	287	75	344	12	351	3	99
69	147	144	261	0.55	0.1583	0.0033	10.2389	0.3525	0.4645	0.0081	2439	36	2457	32	2459	36	101
70	123	105	337	0.31	0.1108	0.0042	4.9028	0.1921	0.3195	0.0041	1813	69	1803	33	1787	20	100
71	185	74	512	0.14	0.1128	0.0031	5.1796	0.1393	0.3298	0.0038	1844	50	1849	23	1837	18	100
72	66	70	105	0.67	0.1716	0.0049	11.6927	0.3163	0.4890	0.0061	2573	48	2580	25	2566	26	104
73	171	87	463	0.19	0.1141	0.0025	5.3269	0.1184	0.3349	0.0035	1866	40	1873	19	1862	17	104
74	72	1175	1435	0.82	0.0534	0.0015	0.2999	0.0088	0.0405	0.0006	346	65	266	7	256	4	99
75	23	208	474	0.44	0.0507	0.0021	0.3009	0.0125	0.0429	0.0005	233	98	267	10	271	3	100
76	139	167	360	0.46	0.1136	0.0023	5.2508	0.1142	0.3330	0.0039	1857	37	1861	19	1853	19	104
77	55	50	180	0.28	0.1109	0.0027	4.0957	0.1004	0.2661	0.0025	1815	43	1653	20	1521	13	100

主体。其他年龄组所占比例小,且年龄结构分散,出现多个低强度峰值。最年轻的锆石年龄为 $256\pm 4\text{Ma}$,最老的锆石年龄为 $2954\pm 25\text{Ma}$ 。

3 盆地碎屑锆石年龄组成与周缘地体年龄结构的对比

对比盆地周缘地体的年龄结构(图7),盆地内碎屑锆石 $266\sim 475\text{Ma}$ 年龄组与南侧二郎坪群火山岩年龄、丹凤群变基性火山岩年龄、刘岭群的碎屑锆石峰值年龄,以及古生代时期沿商丹带侵入秦岭群、二郎坪群、丹凤群的花岗岩体年龄值基本一致。 $1500\sim 1680\text{Ma}$ 、 $1750\sim 2190\text{Ma}$ 、 $2190\sim 2310\text{Ma}$ 年

龄段相当于南侧秦岭群副变质岩($1500\sim 1900\text{Ma}$)及黑云斜长片麻岩、斜长角闪岩年龄。少量古元古代晚期及中新太古代碎屑锆石的年龄值($2400\sim 2650\text{Ma}$ 、 $2700\sim 2800\text{Ma}$ 、 $2850\sim 2960\text{Ma}$)落入秦岭群及宽坪群中较老的年龄范围。

4 讨论

4.1 盆地物源区

通过盆地上三叠统沉积岩碎屑锆石年龄结构与周缘地体年龄结构对比, $266\sim 475\text{Ma}$ 年龄组物源区多为盆地南侧二郎坪群、丹凤群、刘岭群;中元古代、占主体的古元古代碎屑锆石和少量中新太古代

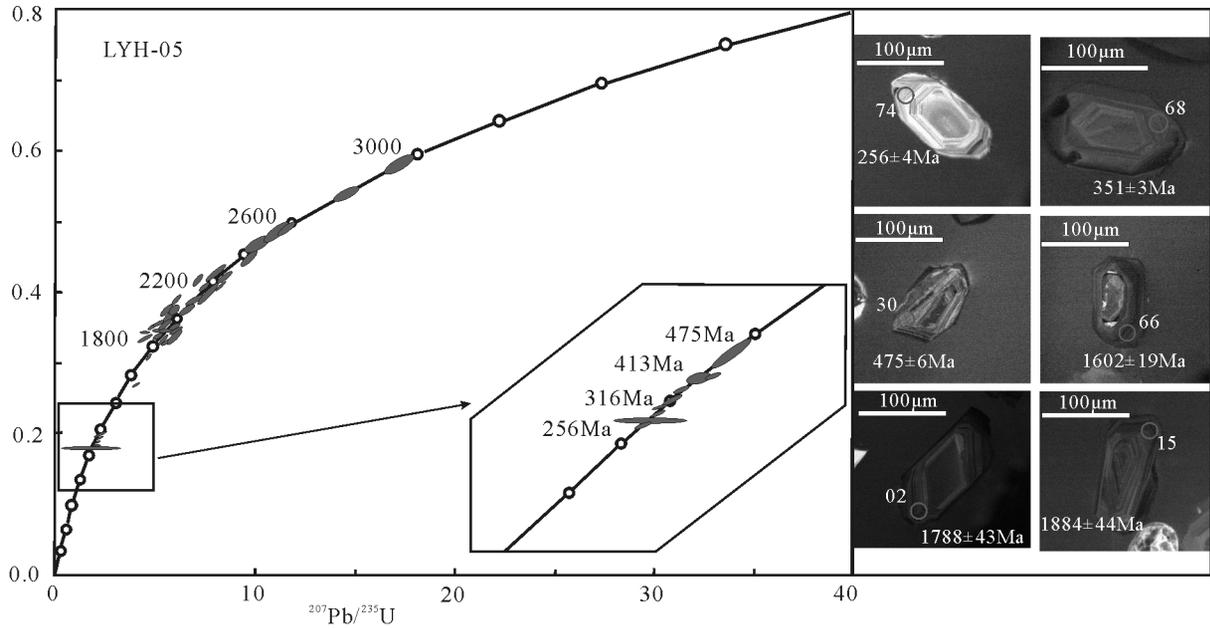


图5 柳叶河盆地石英砂岩中碎屑锆石U-Pb谐和图及锆石CL图像

Fig. 5 U-Pb concordia diagram and CL image of detrital zircons from quartz sandstone of Liuyehe basin

碎屑锆石所代表的碎屑物主要来自盆地南侧的秦岭群。陈世悦^[35]通过对华北地块南部石炭纪—三叠纪沉积盆地物源区分析认为,石炭纪—三叠纪盆地的物源区主要为隆起的北秦岭—北淮阳构造带。总体上,本文碎屑锆石年龄分析结果指示的物源区与上述华北地块南部同时代盆地物源区一致,均为北秦岭物源区。但本文的研究更精细地反映出,在晚三叠世期间盆地内沉积物的主要物源区位于北秦

岭带南部,而非北秦岭带北部。这反映了物源区随时代的变化。

据石炭纪柳叶河盆地碎屑锆石年龄的研究和沉积地质学调查,当时盆地南、北两侧均为隆起的北秦岭山地,且均向盆地提供物源。北侧为以宽坪群为主体的东西向隆起带,介于柳叶河盆地与鄂尔

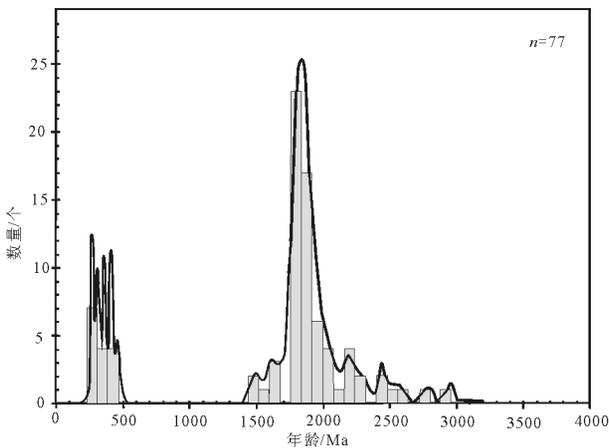


图6 柳叶河盆地碎屑锆石U-Pb年龄分布直方图

Fig. 6 U-Pb age distribution histogram of detrital zircons from Linguanmiao basin

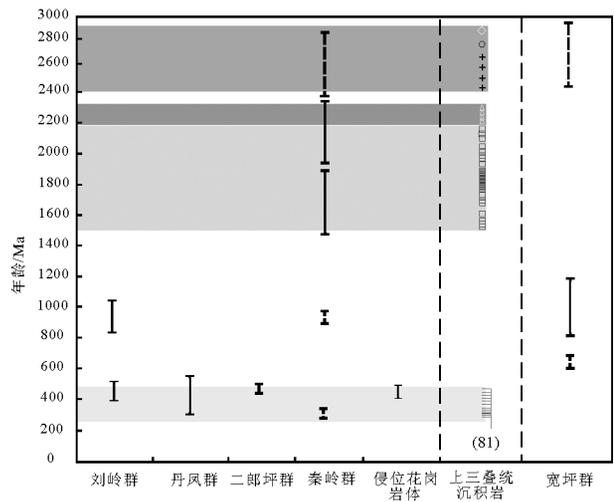


图7 三叠纪柳叶河盆地与周缘地体碎屑锆石年龄结构对比 (实线段代表主要年龄段;虚线段代表次要年龄段)

Fig. 7 Zircon age comparison between Triassic Liuyehe basin and its peripheral terranes

多斯盆地之间,向南、北盆地提供碎屑物质,任军峰^[36]通过对石炭系上部石英砂岩板状交错层理原始产状的恢复,判断古水流方向为由北东至南西,指示当时盆地北侧存在一个隆起区。而南侧由秦岭群、二郎坪群、丹凤群和刘岭群组成。盆地在二叠纪基本保持石炭纪沉积格局,但湖盆范围有所扩大^[36]。如上所述,北秦岭北部为石炭纪—二叠纪柳叶河盆地北侧物源的情形至三叠纪时发生了变化。

此外,晚三叠世柳叶河盆地碎屑锆石年龄结构完全反映了物源区的构造—岩浆作用事件的发育。例如,475~400Ma的锆石年龄代表古秦岭洋盆中奥陶世向北俯冲及其后相关的俯冲造山构造岩浆作用事件;古元古代和中元古代碎屑锆石代表北秦岭地区2.2~1.8Ga、1.4~0.9Ga的2次岩浆作用事件,可能与Columbia和Rodinia超大陆的聚合造山运动有关。但这2个年龄组在北秦岭南缘地区未找到对应年龄结构的岩浆体。

4.2 盆地成因及其与鄂尔多斯盆地的关系

前人认为,在三叠纪期间鄂尔多斯盆地的范围囊括了现今的北秦岭地区。随着三叠纪延长期鄂尔多斯盆地的不断发育,其南缘可能扩大至北秦岭商丹带以北柳叶河地区^[37-38]。为了探讨柳叶河上三叠统盆地与鄂尔多斯盆地西南缘的空间联系,进行了柳叶河盆地上三叠统与鄂尔多斯盆地西南缘延长组砂岩碎屑锆石年龄结构^[39-40]的对比(图8)。结

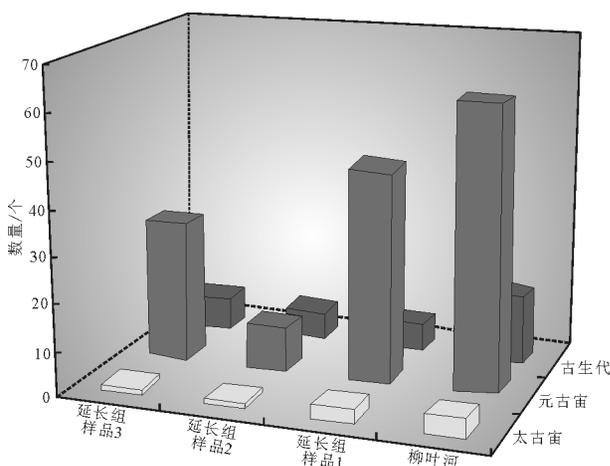


图8 柳叶河盆地上三叠统碎屑锆石与鄂尔多斯盆地西南缘上三叠统延长组碎屑锆石年龄结构对比

Fig. 8 Zircon age comparison between late Triassic Liuyehe basin and upper Triassic Yanchang Formation in southwest Ordos basin

果表明,两盆地碎屑锆石年龄值具以元古宙年龄结构为主的峰值,其次为古生代年龄结构,仅含有少量太古宙碎屑锆石,两者具有相似的年龄结构特征。因此,推测它们不仅共享相同的物源区,而且两者可能在空间上连通,晚三叠世柳叶河盆地代表了鄂尔多斯盆地南部边缘相带沉积。这与刘池阳等^[38]的观点一致。此外,晚三叠世岩相植物群较好的可对比性^[41],也进一步佐证了晚三叠世柳叶河盆地与鄂尔多斯湖盆属于一体的可能性。

根据上述柳叶河盆地碎屑锆石年龄的物源分析,晚三叠世时期盆地沉积物来自北秦岭南缘,而此时,晚古生代介于柳叶河盆地与鄂尔多斯盆地之间的东西向隆起带几近消失,成为次要的剥蚀物源区,向两盆地提供碎屑,柳叶河盆地与鄂尔多斯盆地大部连通,北秦岭南部成为两盆地的主要物源区。因此,碎屑锆石年龄结构对比结果的相似性及盆地物源区的变化均表明,晚三叠世柳叶河盆地与鄂尔多斯盆地极有可能连通。

现今的柳叶河盆地为一山间断陷盆地,可能与后期中—新生代的后期构造事件的改造(燕山运动等)有关,其将原本一体的包括柳叶河盆地在内的鄂尔多斯盆地分割为现今秦岭造山带北部的柳叶河和鄂尔多斯2个相隔的独立盆地。

4.3 物源区构造变迁

如上所述,石炭纪期间介于柳叶河盆地及鄂尔多斯盆地南缘之间,同时向柳叶河与鄂尔多斯盆地提供碎屑物质的北秦岭北部隆起物源区,在经历印支造山运动后几近消失。从前述研究看,晚三叠世时柳叶河盆地的主要物源区已变为北秦岭南部地体。同时,鄂尔多斯盆地南缘也已与柳叶河盆地连通,前者的南缘已经扩大至商丹断裂以北,即柳叶河盆地一线。因此,可以推断,经印支期秦岭全面碰撞造山作用后,北秦岭并未整体隆升而是出现了分化现象,北秦岭南部(秦岭群、二郎坪群、丹凤群)隆升并形成晚三叠世柳叶河盆地及鄂尔多斯盆地南缘的主要物源区,北秦岭北部晚古生代的的东西向隆起则相对沉降,退居为上述盆地的次要物源区(图9)。

柳叶河盆地上三叠统与石炭系碎屑锆石年龄结构^[42]进行对比,前者新元古代年龄结构缺失(图9),也表明晚三叠世盆地北侧具新元古代年龄结构的古陆(宽坪群)相对沉降,成为次要的剥蚀物源区,而此时的主要物源区为盆地南侧北秦岭南部。

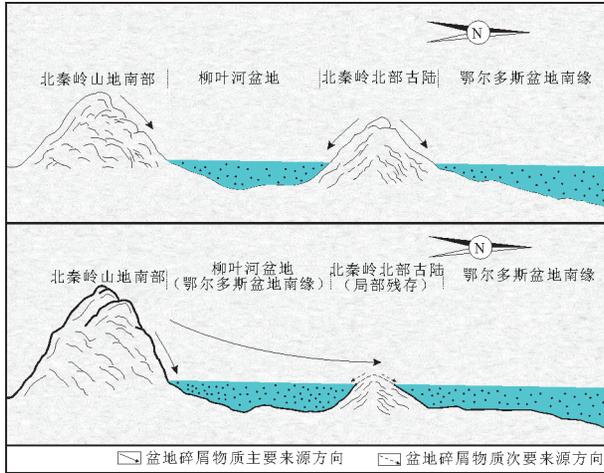


图9 柳叶河盆地石炭纪与晚三叠世构造格局示意图
Fig. 9 Sketch map of tectonic framework of Carboniferous Liuyehe basin and late Triassic Liuyehe basin

除构造地形在南北向上的升降变化外,东西方向上构造地貌也发生了相应改变。根据李兴辉等^[43]的研究,与柳叶河盆地属同一构造带的陕西东部丹凤县同时代(晚三叠世)的灵官庙盆地的年龄结构,仍然表现出新元古代的年龄值(图10),说明柳叶河盆地一带消退了的含新元古代物质的物源区在北秦岭东部依然存在。也就是说,含新元古代物质的宽坪群依然存在并作为其主要物源区。整体上这一物源呈东西向串珠状分布。

因此,从晚三叠世柳叶河盆地物源与周缘盆地的时空对比可以明显看出,构造变动对物源区的改造表现在时间和空间上,是对同一空间内时间维度的改变和同一时间里空间维度的改造。

5 结论

(1)盆地三叠系碎屑锆石主要来自北秦岭造山带南缘二郎坪群(463~475Ma)、秦岭群(1987~2226Ma、1500~1900Ma)、丹凤群(358Ma、391Ma、434Ma)、刘岭群(400~500Ma)、侵入于南缘各岩群的花岗岩体(415~400Ma、455~422Ma、505~470Ma),少量中新太古代碎屑锆石主要来自秦岭群。由于北秦岭造山带的隆升剥蚀为柳叶河盆地提供了大量碎屑物质,故柳叶河盆地与北秦岭造山带构造单元在物质循环上存在耦合关系,换言之,柳叶河盆地的成盆作用是秦岭造山作用的沉积响应,二者是在统一的地球动力学背景下形成的。

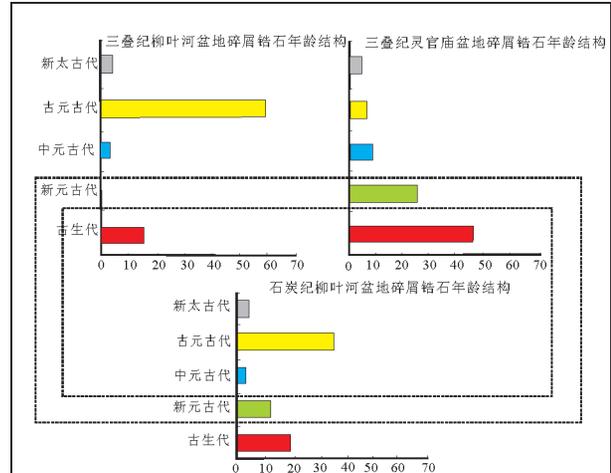


图10 三叠纪与石炭纪柳叶河盆地及三叠纪灵官庙盆地碎屑锆石年龄结构对比
Fig. 10 Age structure comparison between Carboniferous and Triassic strata in Liuyehe basin and Triassic strata in Lingguanmiao basin

(2)晚三叠世柳叶河盆地与鄂尔多斯盆地基本连通,并代表后者的南部边缘,中生代中晚期至新生代受后期构造运动影响,现柳叶河山间断陷盆地分离残存。

(3)晚古生代介于柳叶河盆地与鄂尔多斯盆地之间的东西向古陆(宽坪群)于晚三叠世几近消失,而在北秦岭东部该古陆仍然存在,东西向呈串珠状分布。由于构造运动的影响,该古陆在同一空间内时间维度及同一时间里空间维度均发生了改变。

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和谢晋强博士在实验和数据处理过程中的帮助。

参考文献

[1]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.
[2]翟光明,宋建国,靳久强.板块构造演化与含油气盆地形成和评价[M].北京:石油工业出版社,2002:393-404.
[3]刘树根,罗志立,赵锡奎,等.中国西部盆山系统的耦合关系及其动力学模式[J].地质学报,2003,77(2):177-186.
[4]王立武,王颖,杨静,等.用碎屑锆石 SHRIMP 年代学方法恢复松辽盆地南部前中生代基底的源区特征[J].地学前缘,2007,14(4):151-158.
[5]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 Sciences Lett.

- ters, 1997, 152: 217–231.
- [6] Carter A, Steve J M. Combined detrital zircon fission track and U–Pb dating: a new approach to understanding hinterland evolution[J]. *Geology*, 1999, 27(3): 235–238.
- [7] 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.
- [8] 李任伟, 万渝生, 陈振宇, 等. 根据碎屑锆石 SHRIMP U–Pb 测年恢复早侏罗世大别造山带源区特征[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(4): 320–328.
- [9] 张国伟, 孟庆仁. 华北地块南部巨型陆内俯冲带与秦岭造山带岩石圈现今三维结构[J]. *高校地质学报*, 1997, 3(2): 129–143.
- [10] Echtler H, Malavieille J. Extensional tectonics, basement uplift and Stephano–Permian collapse basin in a late Variscan metamorphic core complex (Montagne Noire, Southern Massif Central) [C]// Matte P. Terranes in the Variscan Belt of Europe and Circum–Atlantic Paleozoic Orogens. *Tectonophysics*, 1990, 177: 125–138.
- [11] Malavieille J. Late orogenic extension in mountain belts: Insights from the basin and range and the Late Paleozoic variscan belt[J]. *Tectonics*, 1993, 12(5): 1115–1130.
- [12] 张国伟, 张宗清. 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[J]. *岩石学报*, 1995, 11(2): 101–114.
- [13] 崔智林, 孙勇, 王学仁. 秦岭丹凤蛇绿岩带放射石的发现及其地质意义[J]. *科学通报*, 1995, 40(18): 1686–1688.
- [14] 张旗, 张宗清, 孙勇, 等. 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[J]. *岩石学报*, 1995, 11(1): 43–54.
- [15] 孙勇, 卢欣祥, 韩松, 等. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26(增刊): 49–55.
- [16] 董云鹏, 张国伟. 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.
- [17] 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.
- [18] 裴先志. 北秦岭造山带的地质特征及其构造演化[J]. *西北地质*, 1995, 16(4): 8–12.
- [19] 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]. 西北大学博士学位论文, 2009.
- [20] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, et al. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: Review and synthesis[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 213–237.
- [21] Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, et al. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history[J]. *Tectonophysics*, 2003, 366: 1–53.
- [22] Wang T, Pei X Z, Wang X X, et al. Orogen–parallel westward oblique uplift of the Qinling complex in the core of the Qinling orogen (China), an example of oblique extrusion of deep–seated metamorphic rocks in a convergent orogen[J]. *Journal of Geology*, 2005, 113: 181–200.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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]. *地质前缘*, 2012, 19(4): 118–125.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] 闫臻, 王宗起, 陈隽璐, 等. 北秦岭武关地区丹凤群斜长角闪岩地球化学特征、锆石 SHRIMP 测年及其构造意义[J]. *地质学报*, 2009, 83(11): 1633–1646.
- [29] 陈龙耀, 罗与凌, 刘晓春, 等. 南秦岭刘岭群砂岩碎屑锆石 LA–ICP–MS U–Pb 年龄及其构造意义[J]. *地质通报*, 2014, 33(9): 1363–1378.
- [30] Ludwig K R. Isoplot 3.0—A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel Berkeley Geochronology Center[J]. Special publication, Berkeley, California. 2003, 4: 1–70.
- [31] Sircombe K N. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, east Australia[J]. *Sedimentary Geology*, 1999, 124: 47–67.
- [32] Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 2004, 28: 353–370.
- [33] Belousova E A, Griffin W L, O’Rilly S Y. Igeous zircon: trace element composition as an indicator of source rock type[J]. *Contributions to Mineral Petrology*, 2002, 143: 602–622.
- [34] Hoskin P W O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as a provenance indicator[J]. *Geology*, 2002, 28(7): 627–630.
- [35] 陈世悦. 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.
- [36] 任军锋. 北秦岭(陕西段)古生代构造体制转换研究[D]. 西北大学硕士学位论文, 2004.
- [37] 王建强. 鄂尔多斯盆地南部中新代演化–改造及盆地耦合关系[D]. 西北大学博士学位论文, 2010.
- [38] 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): 617–635.
- [39] 陈丹敏. 鄂尔多斯盆地西南缘构造演化及其对沉积的控制作用[D]. 山东科技大学硕士学位论文, 2009.
- [40] 宋立军, 陈隽璐, 张英利, 等. 鄂尔多斯盆地西南部纳水河地区上三叠统碎屑锆石 U–Pb 年代学特征及其地质意义[J]. *地质学报*, 2010, 84(3): 370–86.
- [41] 赵重远. 鄂尔多斯盆地的演化历史形成机制和含油气有利地区[M]. 西安: 西北大学出版社, 1990.
- [42] 高春云, 郭安林, 李兴辉, 等. 北秦岭石炭纪–二叠纪柳叶河盆地碎屑锆石 U–Pb 年代学研究及其地质意义[J]. *地质通报*, 待刊.
- [43] 李兴辉, 郭安林, 李侃, 等. 北秦岭灵官庙盆地砂岩碎屑锆石 LA–ICP–MS U–Pb 年龄[J]. *地质通报*, 2014, 33(9): 1353–1362.
- ① 地质部陕西省地质局秦岭区域地质测量大队七分队. 1:20 万《东江口幅》区域地质调查报告, 1966.
- ② 地质部陕西省地质局秦岭区域地质测量大队七分队. 1:20 万《东江口幅》, 1966.
- ③ 西安地质矿产勘查开发研究院. 金景 1:50000 地质图, 1995.