

DOI:10.19751/j.cnki.61-1149/p.2020.02.006

西秦岭临潭地区隆务河组碎屑锆石 U-Pb 年龄、 地球化学特征及沉积环境分析

徐多勋, 魏立勇, 张振, 寇少磊, 常亮, 曹龙

[中国地质调查局西安矿产资源调查中心(原中国人民武装警察黄金第五支队), 陕西 西安 710000]

摘 要:以西秦岭造山带临潭地区早三叠世隆务河组碎屑岩为研究对象, 进行 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究, 探讨其形成时代和源区, 推断其沉积环境。所获得碎屑锆石年龄可划分为 259~418 Ma (16.8%)、448~474 Ma (2.9%)、848~1 115 Ma (2.9%) 和 1 701~2 672 Ma (77.4%) 四组, 最小年龄为 259 Ma, 说明隆务河组沉积时代不早于晚二叠世。综合区域资料限定隆务河组沉积时代为早三叠世, 物源总体来自隆务河盆地北侧新太古代—古元古代火山岩基底, 包括华北板块、西秦岭造山带北缘、祁连造山带东段。结合地球化学及沉积相特征推断隆务河组砂岩主体形成于活动大陆边缘, 为扩张阶段的弧后裂陷盆地。

关键词:隆务河组; 碎屑锆石物源分析; 沉积环境; 西秦岭

中图分类号: P597

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2020)02-0102-24

U-Pb Age, Geochemical Characteristics and Sedimentary Environment Analysis of Detrital Zircons from the Longwuhe Formation in Lintan area, West Qinling

XU Duoxun, WEI Liyong, ZHANG Zhen, KOU Shaolei, CHANG Liang, CAO Long

[Xi'an Mineral Resources Survey Center of China Geological Survey (No. 5 Gold Geological Party of CAPF),
Xi'an 710000, Shaanxi, China]

Abstract: Taking the clastic rocks of the early Triassic Longwuhe Formation in Lintan area, West Qinling orogenic belt, as the research object, the LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology was carried out to explore its formation age and source, and to infer its sedimentary environment. The ages of the obtained detrital zircon can be divided into 4 groups: 259—418 Ma (16.8%), 448—474 Ma (2.9%), 848—1 115 Ma (2.9%) and 1 701—2 672 Ma (77.4%). The minimum age is 259 Ma, indicating that the sedimentary age of the Longwuhe Formation is not earlier than the Late Permian. The comprehensive regional data define the sedimentary age of the Longwuhe Formation as early Triassic. Sediment source is generally from Neo-archean-Paleoproterozoic volcanic basement in the northern side of the Longwuhe basin, including the North China Plate, the northern margin of the Western Qinling orogenic belt, and the eastern section of

收稿日期: 2019-12-02; 修回日期: 2020-04-03

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“甘肃美武—临潭地区 1:5 万区域地质矿产调查”(DD2016007901)

作者简介: 徐多勋(1986-), 男, 陕西榆林人, 硕士, 工程师, 构造地质学专业, 主要从事基础地质调查和项目管理。E-mail: xdxyx@163.com

the Qilian orogenic belt. Combined with geochemical and sedimentary facies characteristics, it is concluded that the main body of the Longwuhe Formation sandstone formed in the active continental margin. The prototype of the basin should be the post-arc rift basin in the expansion stage.

Keywords: Longwuhe Formation; detrital zircon analysis of sediment source; sedimentary environment; West Qinling

0 引言

纵观全球地质构造演化历史,造山带往往是大陆地质构造演化过程的有利记录。陆内碰撞-造山隆升过程的研究对于探讨大陆碰撞造山带的构造演化发展历程具有至关重要的意义。造山带相关的盆地(前陆盆地、弧后盆地等)接收造山带或造山过程中碎屑物源的补给,因此可较完整且有代表性的保存造山带隆升和剥蚀过程的信息(GRIMMER et al., 2003; MALUSA et al., 2011)。从沉积学角度来讲,沉积岩系列的碎屑成分能够有效的追索其主要的沉积物源,进而可一定程度上对造山带的隆升历史进行必要约束。

近年来,随着研究方法不断进步,物源分析已成为开启沉积盆地与造山带之间相互作用关系的一把钥匙(WEISLOGEL et al., 2006; 闫臻等, 2012; 裴先治等, 2007d, 2012)。但在碎屑物质的搬运过程中(主要指从物源区搬运至沉积区),会遭受一系列复杂的物理化学变化,这些过程将极大程度地干扰大陆造山带演化历史的恢复(CAWOOD et al., 2000)。锆石对物理-化学风化作用具有极强的抵抗力,常可用于物源追索研究,可以为造山带和盆地演化提供有效信息。

西秦岭造山带大地构造位置属于秦岭造山带主体的西延段,西邻祁连造山带和东昆仑造山带,是秦岭造山带与祁连造山带、松潘-甘孜造山带、扬子板块之间构造交接转换的地带(张国伟等, 2004),一直是中外学者研究的焦点,在中国大陆板块形成演化过程中占有重要地位(闫臻等, 2002, 2012; 裴先治等, 2007b; 徐学义等, 2014; YU et al., 2020)。自晚古生代以来,西秦岭造山带的主体构造格架和古地理格局均发生了重大变革,在不同时期、不过构造阶段以及不同环境的沉积盆地中所保留下来的碎屑岩类地层指示了该造山带的形成和演化。前人对西秦

岭造山带研究众多,但仍存在诸多分歧:如对西秦岭造山带印支早期的构造演化还存在活动大陆边缘演化阶段(金维浚等, 2005; MENG et al., 2005)和后碰撞造山早期的演化阶段(张成立等, 2008; 张宏飞等, 2006)2种不同的见解;在沉积物源及盆地性质方面,西秦岭是否有来自华北克拉通的物质和晚古生代一早三叠世沉积盆地的属性及盆山转换机制仍存在争议。

笔者利用 LA-ICP-MS 碎屑锆石测年和主、微量元素分析技术,对西秦岭造山带临潭地区早三叠世隆务河组进行系统的碎屑锆石年代学和沉积物源分析,以期探讨其物质组成、沉积环境及物质来源,进一步认识西秦岭造山带的演化历史。

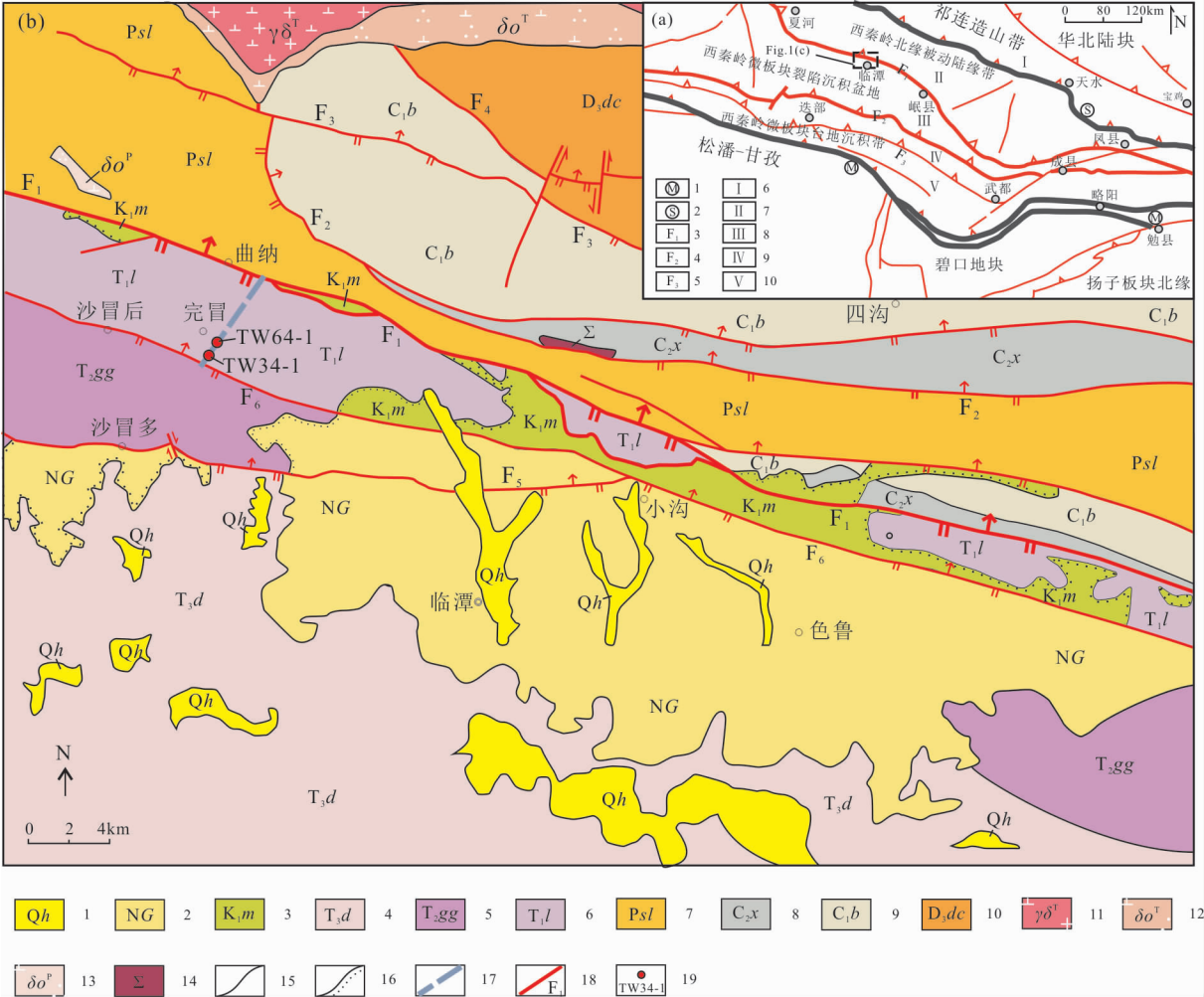
1 区域地质背景

作为中国中央造山带的重要组成部分,秦岭造山带属于特提斯构造域的一部分,长期处于原特提斯洋和古特提斯洋的北缘分支洋盆构造背景,是古秦岭洋向北俯冲过渡到由华北板块与扬子板块沿着商县-丹凤缝合带发生碰撞,最终于印支期结束其主体拼合的“碰撞-陆内型”复合型造山带(张国伟等, 2001; 冯益民等, 2003; 裴先治等, 2007b)。研究区地处秦岭造山带西段,白龙江复背斜的北翼,北接中祁连地块,南邻松潘-甘孜造山带,与松潘-甘孜地区一起构成中国大陆最大的构造结(张国伟等, 2004),是秦岭造山带与祁连造山带、松潘-甘孜造山带、扬子板块之间构造交接转换的地带(图 1)。

研究区西秦岭临潭地区广泛出露晚古生代一中生代早期地层,包括上泥盆统大草滩组(D_3dc)、下石炭统巴都组(C_1b)、上石炭统下加岭组(C_2x)、二叠系十里墩组(P_2l)、下三叠统隆务河组(T_1l)、中三叠统光盖山组(T_2gg)、上三叠统大河坝组(T_3d),缺失侏罗系,部分地区可见白垩系,局部被新近系甘肃群(NG)和第四系覆盖(图 1c)。隆务河组最早由

刘东生(1955)创名便开启了隆务河组沿革的发展,主要指青海省循化县隆务寺黄河河谷剖面出露的黑绿色板岩、砂岩、灰岩及砾岩。甘肃区测队(1971)根据隆务河剖面化石,将原隆务河组细划分为中三叠统古浪堤组和早三叠统隆务河组。甘肃省地质矿产局(1997)将该套地层统称为隆务河组。甘肃地质调查院(2007)完成的1:25万岷县幅修测及甘肃地质调查院(2016)新编《甘肃省区域地质志》,认为早三

叠世沉积盆地由于盆地两侧陆源物的不同,致使盆地两侧沉积物截然不同,故将盆地南侧(白龙江复式背斜以南)的以灰岩为主的碳酸盐台地相沉积地层划为扎里山组、马热松多组,而将盆地北侧(白龙江复式背斜以北)的以细碎屑岩为主的浅海陆棚相沉积地层划为隆务河组。据甘肃地质调查院(2007)1:25万合作市幅所采化石,主要为菊石、双壳类等早三叠世化石。武警黄金部队(2017)完成的1:5万中



(a): 1. 勉略缝合带; 2. 商丹缝合带; 3. 临潭-宕昌-凤县酒奠梁断裂; 4. 迭山-舟曲-谈家庄-江口断裂; 5. 白龙江断裂; 6. 临夏-天水逆冲推覆构造带; 7. 夏河-礼县逆冲推覆构造带; 8. 碌曲-成县逆冲推覆构造带; 9. 迭部-武山逆冲推覆构造带; 10. 郎木寺-南坪逆冲推覆构造带

(b): 1. 第四系冲洪积; 2. 新近系甘肃群; 3. 下白垩统磨沟组; 4. 上三叠统大河坝组; 5. 中三叠统光盖山组; 6. 下三叠统隆务河组; 7. 二叠统十里墩组; 8. 上石炭统下加岭组; 9. 下石炭统巴都组; 10. 上泥盆统大草滩组; 11. 三叠纪美武花岗岩闪长岩; 12. 三叠纪美武石英闪长岩; 13. 二叠纪耿乍西石英闪长岩; 14. 超基性岩; 15. 地质界线; 16. 角度不整合; 17. 实测剖面; 18. 断裂及编号; 19. 同位素年龄采样位置; F₁. 合作-岷县断裂; F₂. 恰龙断裂; F₃. 恰盖南断裂; F₄. 恰盖北断裂; F₅. 临潭西断裂; F₆. 临潭北断裂

图1 (a)西秦岭构造单元简图(据张国伟等,2001修改)及(b)西秦岭临潭地区地质简图(据肖林等,2007)

Fig. 1 (a)Diagram of west Qinling orogenic belt tectonic partition and (b)Geological map of Lintan area in West Qinling orogenic belt

寨幅和十里铺幅区域地质调查时采集微古样品见一枚牙形石,鉴定为 *Pachycladina* sp. 厚齿耙牙形石未定种,该属主要见于中国云南、贵州、四川、湖北等地区下三叠统上部,国际对比大致相当于奥伦尼克阶。

隆务河组主要分布在完冒幅北部,北侧与十里墩组呈断层接触,南侧与光盖山组断层接触。研究区隆务河组地处区域上三叠纪隆务河复理石碎屑岩沉积盆地北部,其主体为一套钙质细碎屑岩沉积为主,局部可见夹有少量灰岩、砾岩沉积。部分砂岩底面不同程度发育有冲刷构造,砂岩、粉砂岩、粉砂质板岩广泛发育平行层理、交错层理、粒序层理、斜层理、重荷模等沉积构造现象。该套地层中褶皱发育,多处发育有紧闭尖棱褶皱和紧闭倒转褶皱等构造变形现象。隆务河组各段韵律沉积较为明显,整体为一套砂岩-粉砂岩-钙、泥质粉砂岩-灰岩的韵律型沉积序列,并且在砂板岩韵律层中发育有鲍玛序列,以 AB、BC 段较常见。A 段主要由长石、岩屑组成杂砂岩,由下至上颗粒逐渐变细,部分底部可见重荷模构造发育;B 段由砂岩和细砂岩组成,具有平行层理;C 段由粉砂岩和少量泥质构成水平层理;局部地段可见较完整的鲍玛序列发育。另外,研究区北部发育有美武复式岩体、日多玛岩体和耿乍西岩体等侵入岩体,其岩石类型以中酸性侵入岩为主,主要包括石英闪长岩、花岗闪长岩、黑云母花岗岩等。

2 隆务河组地质特征及样品描述

西秦岭地区隆务河盆地属于较典型的复理石碎屑岩沉积盆地,其分布范围较广,相变差异较大,以发育厚层-巨厚层状灰-灰绿色砂岩、板岩夹薄层灰岩,局部地段夹不稳定砾岩为主要特征。

隆务河组(T_1l)主要出露于研究区中部,位于隆务河盆地北侧,出露面积较大,主要分布于西秦岭临潭地区完冒乡一带,总体呈 NWW—SEE 向展布,主体为一套浅灰-深灰色中厚层钙质细碎屑岩夹少量灰岩及砾岩沉积,其北侧与二叠系十里墩组呈断层接触,南侧与中三叠统光盖山组、上三叠统大河坝组呈断层接触,部分地段不同程度被白垩系、新近系陆相沉积地层覆盖。依据野外地质调查及其出露岩性组合、基本层序等特征初步将研究区隆务河组划分为三段(图 2),组内各段之间均为整合接触:下段

(T_1l^1)以一套灰绿色厚层-巨厚层中粗粒岩屑长石砂岩与灰黑色薄层粉砂岩互层为主,底部可见发育泥砾、变细砾岩,总体向上呈变细变薄趋势,局部发育重荷模(图 2b)、粒序层理等沉积构造,粉砂岩中局部夹薄层细砂岩,发育交错层理;中段(T_1l^2)主要由一套灰-灰黑色中薄层变粉砂岩,夹灰绿色厚层-巨厚层中粗粒岩屑长石砂岩组成,两者构成沉积旋回,其中粉砂岩较下段明显增多,厚层砂岩出露宽度明显减少,多处粉砂岩中可见较多的灰色薄层细砂岩出露,发育平行层理、交错层理(图 2a)、水平层理;上段(T_1l^3)主体由灰色中厚层状灰色钙泥质、钙铁质粉砂岩和中细粒岩屑砂岩组成,为一套灰-灰黑色中厚层粉砂岩与浅灰绿色-灰黑色板岩互层,夹少量薄层细晶灰岩,粉砂岩中发育水平层理,薄层细砂岩发育少量小型交错层理(图 3)。

本次研究对出露西秦岭临潭地区的隆务河组主体岩石的新鲜面进行多地点采样,为了确保采集样品的代表性和研究的科学性,样品采集过程中尽量避开后期岩浆岩体及脉体,依据临潭地区实测剖面隆务河组地质特征主要采集了灰-灰绿色块状中粗粒岩屑长石砂岩和灰-灰黑色中薄层粉砂岩的地球化学样品和碎屑锆石 U-Pb 定年样品。共采集灰-灰绿色块状中粗粒岩屑长石砂岩地球化学样品 8 件(HX74-1、HX79-1、HX81-1、HX84-1、HX92-1、HX101-1、HX132-1、HX141-1),碎屑锆石 U-Pb 定年样品 2 件。同位素年龄采样点地理坐标为:(TW34-1) $34^{\circ}46'55.457''N$, $103^{\circ}12'27.635''E$; (TW64-1) $34^{\circ}46'57.867''N$, $103^{\circ}12'27.114''E$ (图 1b)。

本次研究采集样品主要为岩屑长石砂岩,其碎屑颗粒主要包括石英、长石、火成岩岩屑、变质岩岩屑,云母少见,分选较差,磨圆度为棱角状-次圆状,填隙物为泥质、细粉砂级碎屑与钙质、铁质胶结物组成。西秦岭临潭地区隆务河组主体岩性以中厚层岩屑长石砂岩及灰色中薄层粉砂岩为主(图 2c、图 2e)。中粗粒岩屑长石砂岩新鲜面多呈灰褐色,风化面为土黄色,具中粗粒砂状结构,块状构造。矿物成分包括碎屑(85%~92%)和填隙物(8%~15%)。其中碎屑主要由石英(40%~45%)、长石(35%~40%)、岩屑(10%~12%)组成,填隙物主要为钙质胶结物(5%)、杂基(3%)。石英粒径约 0.03~0.84 mm,以中粗粒砂状为主,多呈他形粒状;长石粒径约



a. 中粗粒岩屑长石砂岩中交错层理;b. 砂岩中重荷模构造;c. 中粗粒岩屑长石砂岩;d. 中薄层粉砂岩;e. 中粗粒岩屑长石砂岩镜下显微照片(正交偏光);f. 中薄层粉砂岩镜下显微照片(正交偏光);g. 细粒岩屑长石砂岩镜下显微照片(正交偏光);h. 中细粒岩屑长石砂岩镜下显微照片(正交偏光);Qz. 石英;Pl. 斜长石;Or. 正长石;Mi. 微斜长石;Pe. 条纹长石;Ms. 白云母;Lm. 铁质;Cal. 方解石;VRF. 火成岩岩屑;BRF. 基性岩岩屑;MRF. 变质岩岩屑

图 2 隆务河组砂岩野外特征及显微照片

Fig. 2 Field characteristics and Micrographs of sandstone in Longwuhe Formation

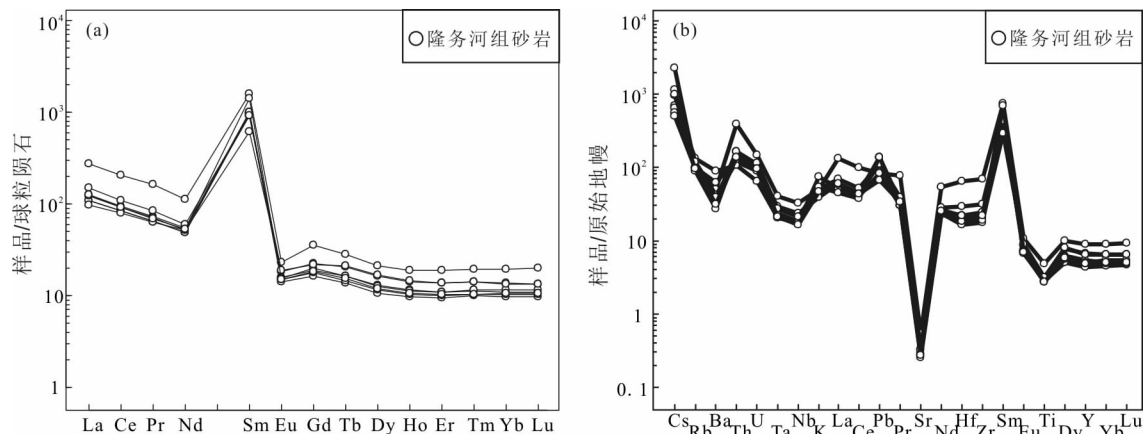


图3 (a)隆务河组砂岩稀土元素球粒陨石标准化配分图(球粒陨石数据据 BOYNTON, 1984)和(b)微量元素原始地幔标准化蛛网图(原始地幔数据据 SUN et al., 1989)

Fig. 3 (a)REE distribution patterns and (b)primitive mantle normalized incompatible element spider diagram of the Longwuhe Formation sandstones

0.03~1.18 mm,多呈半自形板状、他形粒状,可见具聚片双晶,局部发育绢云母化;颗粒较大的长石、石英保留原次棱角-次圆状外形。填隙物沿碎屑周边分布,由钙质胶结物(主要为方解石)及杂基组成,粒径约0.01~0.26 mm,多呈细晶状,呈他形粒状胶结于碎屑颗粒之间。岩石主要为颗粒支撑(点-线状接触),孔隙式胶结。

灰色中薄层粉砂岩新鲜面多呈灰-灰褐色,风化面土黄色,呈粉砂结构,块状构造。岩石由石英(50%~55%)、方解石(20%~25%)、长石(4%~7%)、绢(白)云母(2%)、铁质胶结物(4%)等主要矿物组成。石英粒径约0.01~0.08 mm,多呈他形粒状、次棱角状,边缘可见锯齿状。长石粒径约0.03~0.06 mm,多呈半自形板状,他形粒状,可见发育有聚片双晶。方解石粒径约0.01~0.05 mm,呈微晶状,他形粒状,填充于石英颗粒之间。绢(白)云母石粒径约0.02~0.20 mm,鳞片状(图2d、图2f)。

3 测试方法

3.1 锆石 U-Pb 测年

本次实验锆石分选工作在中国地质调查局天津地质调查中心实验室完成。首先运用常规方法将样品粉碎至80~100目,用磁选和浮选法分选,得到>200粒锆石颗粒,然后在双目镜下挑出透明度和晶形较好的锆石颗粒作为测定对象,将锆石颗粒粘在双面胶上,用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂

充分固化后,对其表面进行抛光至锆石内部暴露,再进行锆石显微(反射光和透射光)照相、阴极发光CL显微图像研究及LA-ICP-MS分析。测试点的选择首先依据锆石反射光和透射光显微照片进行初选,再与CL照片进行反复比对,尽量要避开包裹体、内部裂隙及不同成因的区域,从而得到较精确的年龄信息。

单颗粒锆石原位U-Pb同位素年龄分析在天津地质矿产研究所同位素实验室的激光烧蚀多接收器等离子体质谱(LA-MC-ICP-MS)上测定,仪器为ThermoFisher公司制造的Neptune,利用193 nm的激光器对锆石进行剥蚀,激光剥蚀的斑束直径通常为35 μm ,锆石标样采用GJ-1标准锆石。运用中国地质大学刘勇胜博士研发的ICP-MS DataCal程序进行数据处理,应用Isoplot 3.0进行加权平均年龄计算及谐和图的绘制,普通铅的校正正是利用 ^{208}Pb 校正法。以玻璃标样NIST612作为外标计算锆石样品的Pb、U、Th含量。本次获得的碎屑年龄对于小于1.0Ga的锆石采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄;对于大于1.0Ga的锆石采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(CAWOOD et al., 2001; 吴元保等, 2004)。

3.2 岩石地球化学测试

将样品磨碎至200目后,全岩主量、稀土和微量元素测试在长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室完成。主量元素测试采用XRF法,用日本岛津XRF-1800型波长色散X射线荧光光谱仪测定,X射线荧光光谱分析熔片法按国家标准

GB/T14506.28-1993,相对误差小于2%。稀土和微量元素分析采用 Thermo-X7 电感耦合等离子体质谱仪,分析精度和准确度优于10%。将200目以下样品(500 mg)置于 PTFE 坩锅,加入添加剂(1.0 mL高纯 HF 和 1.5 mL 高纯 HNO₃),按照标准测试程序,反复添加、加热、冷却后,最后在离心管中稀释到 50 mL;将所得溶液在电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)上完成测定。化学分析测试流程参考 CHEN et al. (2000)。

4 分析结果

4.1 岩石地球化学

4.1.1 主量元素特征

研究区隆务河组砂岩中 SiO₂ 含量变化范围较

小,为 58.03%~72.69%,平均为 65.43%。Al₂O₃ 的含量在 10.90%~13.14%,平均为 12.04%;Na₂O 的含量为 0.11%~3.52%,平均为 2.21%;K₂O 的含量为 1.12%~2.16%,平均为 1.52%;岩石全碱 K₂O+Na₂O 为 1.49%~5.55%,平均为 3.72%,显示全碱含量较低;Na₂O/K₂O 为 0.07~2.41,平均为 1.46;MgO 的含量为 1.47%~3.24%,平均为 2.16%;TiO₂ 的含量为 0.54%~0.97%,平均为 0.63%;CaO 的含量为 1.39%~7.65%,平均为 3.73%;Al₂O₃/(CaO+Na₂O)值为 0.63~2.70,平均为 1.37;Al₂O₃/SiO₂ 值为 0.16~0.21,平均为 0.19(表 1)。

PAAS(澳大利亚后太古宙平均页岩)被认为是上地壳平均化学成分(TAYLOR et al.,1985),对比隆务河组的平均主量元素含量可以看出,隆务河组

表 1 隆务河组砂岩的主量元素(%)和微量元素(10⁻⁶)分析结果表
Tab.1 Major element(%)and trace elements (10⁻⁶) of sandstone in Longwuhe Formation

样品	HX74-1	HX79-1	HX81-1	HX84-1	HX92-1	HX101-1	HX132-1	HX141-1
SiO ₂	63.16	58.04	61.14	68.33	70.84	72.69	58.03	71.25
Al ₂ O ₃	10.94	10.90	12.66	13.14	12.85	11.80	12.14	11.93
TFe ₂ O ₃	5.47	6.32	6.23	4.48	4.40	4.11	6.69	3.68
CaO	5.65	7.65	4.88	1.56	1.39	1.70	4.70	2.33
MgO	2.32	3.24	2.28	1.95	1.80	1.68	2.57	1.47
K ₂ O	1.46	1.12	1.53	2.16	1.46	1.47	1.54	1.38
Na ₂ O	2.46	2.13	2.72	3.39	3.52	3.23	0.11	0.12
P ₂ O ₅	0.19	0.19	0.15	0.13	0.14	0.13	0.16	0.12
TiO ₂	0.97	0.64	0.56	0.57	0.54	0.57	0.64	0.54
MnO	0.08	0.13	0.10	0.05	0.03	0.06	0.11	0.09
LOI	6.46	9.30	6.28	2.90	2.39	2.66	10.92	6.55
Total	99.15	99.66	98.53	98.65	99.36	100.09	97.60	99.45
La	85.32	39.30	33.80	33.32	38.25	45.87	29.70	39.23
Ce	166.44	76.93	67.73	67.55	75.10	86.97	63.93	74.37
Pr	19.78	8.89	7.87	7.83	8.52	10.13	7.77	8.49
Nd	67.27	32.76	29.29	28.84	30.97	35.85	31.28	31.56
Sm	306.64	178.85	194.92	188.45	196.88	180.52	119.95	278.61
Eu	1.68	1.34	1.17	1.04	1.11	1.13	1.38	1.09
Gd	9.19	5.80	4.86	4.24	4.56	5.11	5.69	4.75
Tb	1.32	0.96	0.78	0.64	0.69	0.76	0.99	0.73
Dy	6.81	5.23	4.20	3.40	3.74	4.03	5.44	3.86

续表 1

样品	HX74-1	HX79-1	HX81-1	HX84-1	HX92-1	HX101-1	HX132-1	HX141-1
Ho	1.34	1.02	0.82	0.69	0.74	0.80	1.06	0.76
Er	3.90	2.85	2.32	1.99	2.13	2.30	2.90	2.17
Tm	0.62	0.46	0.37	0.32	0.34	0.38	0.46	0.33
Yb	4.01	2.83	2.25	2.02	2.12	2.40	2.82	2.20
Lu	0.63	0.43	0.35	0.31	0.33	0.37	0.43	0.34
Ba	328.01	183.16	279.99	602.60	413.36	243.33	257.74	207.27
Be	1.45	1.56	1.86	1.88	1.81	1.50	1.95	1.47
Co	14.27	17.04	12.96	13.90	13.00	10.47	17.47	9.16
Cr	2.41	2.82	3.74	2.95	2.73	2.71	4.51	3.38
Cs	48.89	24.62	20.28	14.72	13.48	11.74	21.37	10.67
Cu	83.34	56.26	68.30	64.65	65.37	63.28	71.66	49.18
Ga	15.23	14.26	17.37	16.82	16.82	14.68	15.50	14.57
Hf	18.52	6.27	4.71	5.39	6.27	8.44	5.25	6.22
Li	34.66	48.33	48.88	34.36	34.63	25.40	27.99	34.30
Nb	21.31	15.57	12.23	11.51	11.93	11.79	14.09	10.98
Ni	25.91	29.30	29.19	28.73	26.33	22.59	34.61	11.41
Pb	12.38	16.50	20.82	12.62	20.94	16.71	20.66	10.07
Rb	59.02	53.27	71.89	79.45	60.96	60.08	70.89	57.24
Sc	12.75	10.46	11.34	10.50	10.09	9.16	12.14	9.31
Sr	10.83	6.60	5.60	5.06	5.39	5.95	6.59	5.46
Ta	1.50	1.09	0.83	0.76	0.87	0.84	1.02	0.80
Th	31.07	12.94	9.42	8.55	10.23	12.99	10.85	10.96
U	3.02	1.87	1.85	1.33	2.13	2.27	2.37	1.93
V	81.85	63.75	75.81	71.69	68.69	64.87	78.03	60.85
Y	38.63	29.30	23.40	18.85	20.65	21.65	28.28	20.81
Zn	74.06	92.35	76.27	65.30	60.38	49.37	85.02	42.42
Zr	727.14	246.96	184.14	216.68	254.70	335.26	198.55	234.27
δEu	18.63	5.19	4.69	6.44	8.15	12.95	4.52	10.50
ΣREE	801.21	339.31	260.41	281.98	315.08	384.63	283.56	276.69

注:主微量稀土分析由具有国家资质的原武警黄金二总队中心化验室测试分析完成,2017;分析鉴定样品经抽检符合相关质量要求。

样品 SiO₂ 平均值略高于 PAAS(62.80%),反映石英或富含 SiO₂ 的矿物含量略高,岩石的成分成熟度较高;Al₂O₃/SiO₂ 值为 0.16~0.21(平均为 0.19),整体上没有明显变化,表明其经历搬运、蚀变和再造作用程度很弱。

4.1.2 微量和稀土元素特征

在稀土元素配分图(图 3a)中,隆务河组样品稀

土总量(ΣREE)为 273.78×10⁻⁶~674.95×10⁻⁶,轻稀土含量(ΣLREE)为 254.00×10⁻⁶~647.12×10⁻⁶,平均为 380.70×10⁻⁶;重稀土含量(ΣHREE)为 13.61×10⁻⁶~27.83×10⁻⁶,平均为 17.84×10⁻⁶,轻、重稀土元素含量比值(ΣLREE/ΣHREE)为 12.84~28.63,平均为 21.66;所有样品均表现为轻稀土富集明显(La_N/Yb_N为 7.55~

15.27, 平均为 11.86), 重稀土元素较为平坦, 且重稀土元素的分馏程度强于轻稀土元素。Eu 负异常明显(δEu 为 0.02~0.06, 平均为 0.03), 无 Ce 异常($63.93 \times 10^{-6} \sim 166.44 \times 10^{-6}$, 平均为 84.88×10^{-6}), 稀土元素分配曲线显示与上地壳标准化数据相似, 区别于下地壳标准化数据。

微量元素蛛网图(图 3b)反映样品相对富集 Cs、Li、Th、U、Pb、Sm 等元素, Ba、Cr、Nb、Ta、Ti 等元素相对亏损, Sr 严重亏损, 样品微量元素含量总体上与上地壳各元素含量基本吻合。V/(V+Ni) 值为 0.69~0.84, 平均为 0.74, 多数样品比值均大于 0.7; (Zn+Ni)/Ga 值变化范围为 3.69~7.53, 平均为 6.03, 总体反映出研究区隆务河组沉积于缺氧还原环境。

4.2 碎屑锆石 U-Pb 年龄

对于同位素年龄大于 1 200Ma 的样品锆石, 因

其含放射性成因 Pb 过量, 因此采用受 Pb 丢失影响较小的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄(CAWOOD et al., 2000)。

隆务河组岩屑长石砂岩样品(TW34-1)锆石形状多呈短柱状, 少数为锥状及长柱状, 多数锆石均表现出不同程度磨圆, 锆石颗粒长度为 55~255 μm , 宽度为 45~85 μm , 长宽比为 1:1~1:3。多数锆石具有典型的岩浆振荡环带和明暗相间的条带状结构(如测点 80、48、55、69、3、77 等); 部分锆石具有较完整的晶型, 呈棱角状-次棱角状, 但阴极发光(CL)显微照片显示整体的灰-灰白色, 这类锆石可能是由于脱晶化作用形成的锆石(如测点 57、21、2 等); 部分锆石具有核幔结构, 其核部保留了较老的岩浆活动信息(如测点 42), 以上多重成因类型的锆石, 反映出物源区类型的多样性和复杂性(图 4)。

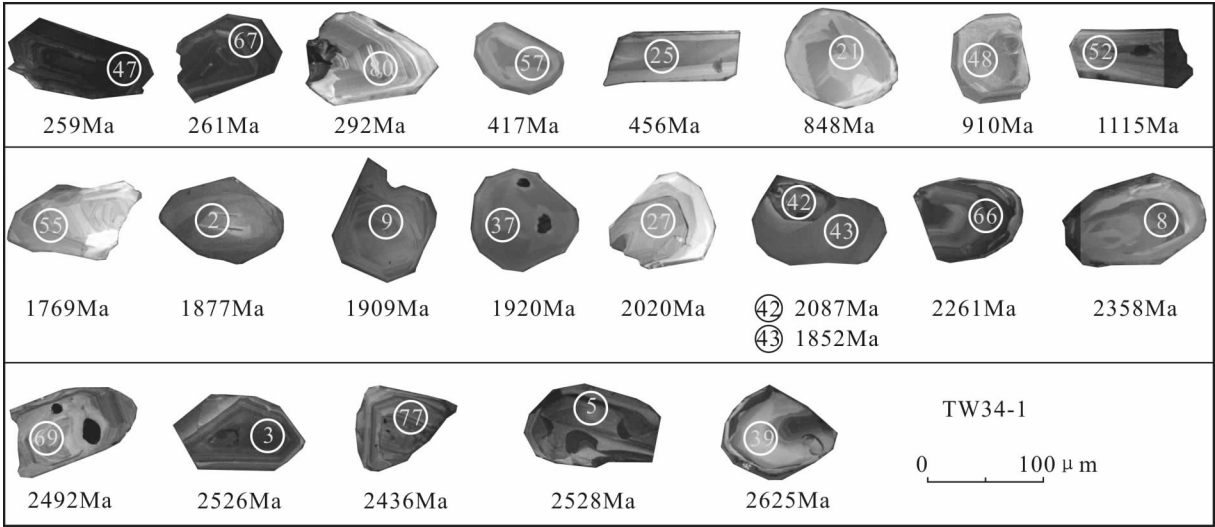


图 4 隆务河组样品(TW34-1)代表性锆石阴极发光图像及年龄图

Fig. 4 Cathodoluminescence (CL) images and ages of single zircon from the Longwuhe Formation rock samples (TW34-1)

岩屑长石砂岩同位素年龄样品(TW34-1)85 个测点(表 2), 64 颗落在谐和线或其附近。样品 TW34-1 中锆石 Pb 含量为 $11.70 \times 10^{-6} \sim 12\,960 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $26.91 \times 10^{-6} \sim 12\,353 \times 10^{-6}$, U 含量为 $36.14 \times 10^{-6} \sim 21\,968 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.09~1.97。其中有 55 颗锆石的 Th/U 值大于 0.4, 仅有 1 颗锆石的 Th/U 值小于 0.1。结合锆石 Th/U 值, 表明这些锆石颗粒大多都属于岩浆成因(HOSKIN, 2003)。此次所测锆石年龄范围为

259~2 672 Ma。从锆石 U-Pb 年龄直方图可以看出(图 5), 隆务河组样品 TW34-1 碎屑锆石年龄可区分为 4 组 259~418 Ma, 共计 10 颗, 占比 15.6%(64); 448~456 Ma, 共计 2 颗, 占比 3.1%(64); 848~1 115 Ma, 共计 4 颗, 占比 6.3%(64); 1 701~2 672 Ma, 共计 48 颗, 占比 75.0%(64)。

隆务河群岩屑长石砂岩样品(TW64-1)锆石形状多呈短柱状, 少数为锥状及长柱状, 多数锆石均表现出不同程度的机械磨圆, 具有碎屑锆石的基本

表 2 隆务河组砂岩样品 (TW34-1) LA-ICP-MS 年龄测试数据表

Tab. 2 LA-ICP-MS age test data of Longwuhe Formation sandstone sample (TW34-1)

测点	元素含量(10 ⁻⁶)				同位素比值						同位素年龄(Ma)						优选
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	年龄
TW34-1-47	2 208.83	12 352.78	19 913.00	0.62	0.053 2	0.001 2	0.301 6	0.007 4	0.041 1	0.000 4	345	52	268	6	259	3	259
TW34-1-67	2 165.02	9 576.75	21 968.47	0.44	0.051 6	0.001 2	0.298 0	0.009 0	0.041 4	0.000 7	333	54	265	7	262	4	262
TW34-1-61	774.73	3 740.47	6 135.54	0.61	0.051 1	0.002 7	0.302 2	0.016 7	0.042 6	0.000 6	256	124	268	13	269	4	269
TW34-1-80	1 163.29	6 015.13	5 135.26	1.17	0.054 5	0.002 5	0.342 0	0.014 8	0.046 3	0.000 9	391	108	299	11	292	6	292
TW34-1-53	664.02	3 641.40	6 146.42	0.59	0.048 1	0.001 9	0.300 5	0.012 8	0.046 7	0.002 5	102	94	267	10	294	15	294
TW34-1-79	763.46	3 436.32	5 054.64	0.68	0.059 9	0.006 8	0.364 3	0.043 2	0.048 5	0.003 8	598	248	315	32	305	24	305
TW34-1-41	488.07	2 142.84	1 845.67	1.16	0.056 3	0.008 3	0.406 7	0.057 9	0.055 0	0.003 1	465	333	346	42	345	19	345
TW34-1-49	1 858.22	7 617.44	6 510.79	1.17	0.054 1	0.001 9	0.458 5	0.016 2	0.061 8	0.000 9	372	75	383	11	387	5	387
TW34-1-22	11.70	119.08	127.82	0.93	0.057 5	0.001 0	0.518 8	0.011 5	0.065 4	0.001 1	522	39	424	8	409	7	409
TW34-1-57	898.58	3 065.75	4 030.80	0.76	0.055 1	0.003 3	0.506 2	0.028 9	0.066 9	0.001 0	417	133	416	20	418	6	418
TW34-1-30	12.26	118.50	130.53	0.91	0.058 9	0.000 9	0.587 0	0.018 6	0.072 0	0.001 8	565	33	469	12	448	11	448
TW34-1-25	18.75	290.96	149.10	1.95	0.059 6	0.000 8	0.603 3	0.009 9	0.073 4	0.000 9	591	28	479	6	456	5	456
TW34-1-21	21.74	72.30	119.52	0.60	0.072 9	0.001 0	1.410 7	0.025 7	0.140 6	0.002 5	1 013	30	893	11	848	14	848
TW34-1-75	3 693.46	4 594.62	10 556.46	0.44	0.069 8	0.001 6	1.436 2	0.042 6	0.149 7	0.003 4	922	48	904	18	899	19	899
TW34-1-48	4 196.31	5 168.24	12 025.32	0.43	0.062 8	0.001 1	1.304 0	0.026 8	0.151 6	0.003 4	702	36	848	12	910	19	910
TW34-1-52	3 865.68	2 423.21	9 588.68	0.25	0.076 7	0.003 4	2.367 3	0.108 2	0.223 3	0.002 1	1 115	117	1 233	33	1 299	11	1 115
TW34-1-60	2 546.77	1 612.47	2 827.18	0.57	0.104 3	0.001 8	4.768 6	0.083 0	0.330 0	0.003 6	1 702	66	1 779	15	1 838	17	1 702
TW34-1-64	6 663.29	2 757.37	15 637.96	0.18	0.106 5	0.001 1	3.955 6	0.062 3	0.266 9	0.003 3	1 740	19	1 625	13	1 525	17	1 740
TW34-1-63	1 036.60	868.47	758.68	1.14	0.106 6	0.003 8	4.601 5	0.164 9	0.312 0	0.004 9	1 743	65	1 750	30	1 751	24	1 743
TW34-1-56	9 037.67	3 950.46	13 812.24	0.29	0.107 6	0.001 0	4.979 4	0.077 2	0.333 8	0.003 9	1 761	17	1 816	13	1 857	19	1 761
TW34-1-33	26.58	55.76	66.22	0.84	0.107 9	0.000 9	4.561 3	0.104 9	0.305 9	0.006 6	1 765	16	1 742	19	1 720	33	1 765
TW34-1-55	2 718.81	1 918.38	2 555.26	0.75	0.108 1	0.008 3	4.677 2	0.288 8	0.317 2	0.003 9	1 769	141	1 763	52	1 776	19	1 769
TW34-1-45	3 912.79	2 886.56	3 461.20	0.83	0.108 5	0.002 7	4.923 2	0.130 2	0.328 5	0.003 8	1 776	46	1 806	22	1 831	18	1 776
TW34-1-34	71.06	74.03	176.96	0.42	0.109 2	0.001 0	4.795 8	0.115 1	0.317 1	0.006 3	1 787	18	1 784	20	1 776	31	1 787

续表 2

测点	元素含量(10 ⁻⁶)					同位素比值						同位素年龄(Ma)				优选	
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb		1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
TW34-1-54	5 846.32	4 195.94	5 011.16	0.84	0.109 2	0.001 5	4.952 7	0.113 8	0.327 4	0.005 7	1 787	24	1 811	19	1 826	28	1 787 24
TW34-1-44	3 379.86	1 037.65	6 418.02	0.16	0.109 6	0.001 5	4.972 8	0.086 9	0.327 7	0.003 7	1 794	25	1 815	15	1 827	18	1 794 25
TW34-1-62	2 902.97	1 973.15	2 839.94	0.69	0.110 7	0.004 1	4.930 4	0.194 1	0.324 3	0.006 8	1 810	67	1 807	33	1 811	33	1 810 67
TW34-1-68	3 804.29	857.07	9 823.05	0.09	0.110 8	0.003 9	4.549 6	0.150 6	0.317 0	0.024 6	1 813	63	1 740	28	1 775	120	1 813 63
TW34-1-65	6 642.99	3 917.95	8 695.25	0.45	0.110 9	0.002 6	4.943 6	0.114 9	0.321 5	0.004 1	1 814	41	1 810	20	1 797	20	1 814 41
TW34-1-70	12 651.64	8 839.87	12 300.86	0.72	0.112 1	0.002 1	5.106 9	0.077 2	0.334 2	0.008 9	1 835	67	1 837	13	1 859	43	1 835 67
TW34-1-35	15.26	36.86	36.14	1.02	0.112 2	0.002 6	4.636 6	0.114 3	0.299 3	0.004 4	1 836	41	1 756	21	1 888	22	1 836 41
TW34-1-43	4 823.89	2 863.88	5 489.85	0.52	0.113 2	0.001 6	5.284 1	0.100 8	0.336 9	0.004 7	1 852	24	1 866	16	1 872	23	1 852 24
TW34-1-02	761.49	650.79	723.91	0.90	0.114 9	0.002 1	5.402 1	0.116 8	0.338 6	0.004 1	1 877	27	1 885	19	1 880	20	1 877 27
TW34-1-78	3 388.68	3 336.41	5 730.08	0.58	0.115 5	0.002 6	4.918 9	0.114 8	0.308 9	0.004 6	1 887	36	1 805	20	1 735	23	1 887 36
TW34-1-09	1 098.64	781.78	1 003.06	0.78	0.116 9	0.002 1	5.239 5	0.100 9	0.324 1	0.003 7	1 909	32	1 859	16	1 810	18	1 909 32
TW34-1-06	1 974.03	1 077.28	2 370.75	0.45	0.117 2	0.001 4	5.643 8	0.078 7	0.347 7	0.003 7	1 913	26	1 923	12	1 924	18	1 913 26
TW34-1-37	25.72	72.82	48.73	1.49	0.117 6	0.001 3	5.547 0	0.116 0	0.341 0	0.006 0	1 920	19	1 908	18	1 891	29	1 920 19
TW34-1-71	4 899.02	3 738.33	3 831.79	0.98	0.117 0	0.003 0	5.194 2	0.125 9	0.321 3	0.004 6	1 922	51	1 852	21	1 796	23	1 922 51
TW34-1-04	1 470.09	983.86	1 297.24	0.76	0.117 1	0.001 8	5.432 4	0.119 5	0.334 3	0.005 3	1 922	28	1 890	19	1 859	26	1 922 28
TW34-1-84	10 455.50	5 953.72	11 198.98	0.53	0.123 3	0.001 6	6.053 3	0.108 1	0.354 8	0.007 0	2 006	23	1 984	16	1 957	33	2 006 23
TW34-1-27	111.57	94.85	282.23	0.34	0.124 4	0.000 9	5.486 7	0.108 4	0.320 1	0.006 6	2 020	13	1 899	17	1 790	32	2 020 13
TW34-1-85	3 427.14	2 196.31	2 989.47	0.73	0.127 2	0.003 0	6.468 5	0.164 5	0.365 7	0.005 3	2 061	42	2 042	22	2 009	25	2 061 42
TW34-1-40	1 218.63	754.96	1 207.46	0.63	0.128 8	0.003 4	5.822 1	0.144 2	0.354 1	0.005 4	2 083	46	1 950	21	1 954	26	2 083 46
TW34-1-42	4 367.05	4 086.07	3 970.60	1.03	0.129 1	0.002 2	6.706 1	0.098 9	0.379 5	0.007 1	2 087	29	2 073	13	2 074	33	2 087 29
TW34-1-50	12 038.56	4 000.43	21 298.48	0.19	0.131 7	0.001 4	7.151 6	0.143 3	0.391 6	0.004 5	2 121	19	2 130	18	2 130	21	2 121 19
TW34-1-82	12 959.56	8 501.18	16 867.77	0.50	0.134 8	0.001 4	7.276 9	0.120 2	0.390 4	0.006 7	2 162	19	2 146	15	2 125	31	2 162 19
TW34-1-81	4 457.58	744.23	6 930.61	0.11	0.140 7	0.002 2	8.334 3	0.180 7	0.431 9	0.010 5	2 236	26	2 268	20	2 314	47	2 236 26
TW34-1-66	7 440.05	3 170.07	7 575.63	0.42	0.142 8	0.001 7	8.311 8	0.106 4	0.420 7	0.005 4	2 261	21	2 266	12	2 264	25	2 261 21
TW34-1-51	5 343.76	1 877.96	5 232.12	0.36	0.145 5	0.001 7	9.231 8	0.185 7	0.459 6	0.005 5	2 294	20	2 361	18	2 438	24	2 294 20

续表 2

测点	元素含量(10 ⁻⁶)				同位素比值						同位素年龄(Ma)						优选	
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	年龄	1σ
TW34-1-73	6 366.24	5 461.14	7 563.25	0.72	0.146 4	0.004 2	7.630 0	0.294 7	0.373 9	0.007 0	2 306	50	2 188	35	2 048	33	2 306	50
TW34-1-46	9 188.68	5 513.46	5 069.57	1.09	0.147 9	0.002 2	8.774 3	0.171 1	0.429 0	0.005 6	2 321	26	2 315	18	2 301	25	2 321	26
TW34-1-72	7 392.21	3 170.43	6 822.26	0.46	0.149 4	0.002 5	9.192 5	0.162 9	0.445 4	0.006 8	2 339	29	2 357	16	2 375	30	2 339	29
TW34-1-08	3 390.62	1 973.06	2 134.70	0.92	0.151 1	0.001 3	8.764 2	0.115 5	0.418 4	0.004 5	2 358	15	2 314	12	2 253	20	2 358	15
TW34-1-58	1 837.96	1 217.44	618.66	1.97	0.155 2	0.006 5	9.691 9	0.393 0	0.457 9	0.009 8	2 406	71	2 406	37	2 430	43	2 406	71
TW34-1-77	5 265.02	2 683.01	3 938.45	0.68	0.158 2	0.002 8	9.689 1	0.132 6	0.451 1	0.011 4	2 436	29	2 406	13	2 400	51	2 436	29
TW34-1-32	95.26	150.16	145.16	1.03	0.161 5	0.001 3	10.118 1	0.193 1	0.454 0	0.008 4	2 472	14	2 446	18	2 413	37	2 472	14
TW34-1-23	175.09	339.97	298.34	1.14	0.162 7	0.001 2	9.086 3	0.136 1	0.404 5	0.005 8	2 484	13	2 347	14	2 190	26	2 484	13
TW34-1-69	8 959.42	5 071.27	5 200.23	0.98	0.163 5	0.002 2	10.715 8	0.180 0	0.474 3	0.008 4	2 492	23	2 499	16	2 502	37	2 492	23
TW34-1-24	27.63	34.80	47.31	0.74	0.164 7	0.001 5	9.509 2	0.150 7	0.419 0	0.006 8	2 506	16	2 388	15	2 256	31	2 506	16
TW34-1-36	41.63	26.91	67.81	0.40	0.165 9	0.001 5	11.194 3	0.237 8	0.488 2	0.009 6	2 517	15	2 539	20	2 563	41	2 517	15
TW34-1-03	2 883.75	880.56	3 483.32	0.25	0.166 8	0.001 7	11.551 8	0.174 4	0.499 6	0.006 7	2 526	17	2 569	14	2 612	29	2 526	17
TW34-1-05	1 766.51	927.96	869.71	1.07	0.166 9	0.002 2	11.432 5	0.185 1	0.496 1	0.007 9	2 528	23	2 559	15	2 597	34	2 528	23
TW34-1-39	2 454.49	1 377.82	1 275.36	1.08	0.177 0	0.003 2	10.782 7	0.205 5	0.486 5	0.006 9	2 625	31	2 505	18	2 555	30	2 625	31
TW34-1-38	2 133.32	1 009.39	1 632.92	0.62	0.182 0	0.003 5	10.792 4	0.218 4	0.487 6	0.009 6	2 672	32	2 505	19	2 560	41	2 672	32

注:分析测试采用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,分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nmArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30 μm,激光剥蚀斑束深度为 20~40 μm。采用年龄为 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,其加权平均值具有 95% 的置信度。

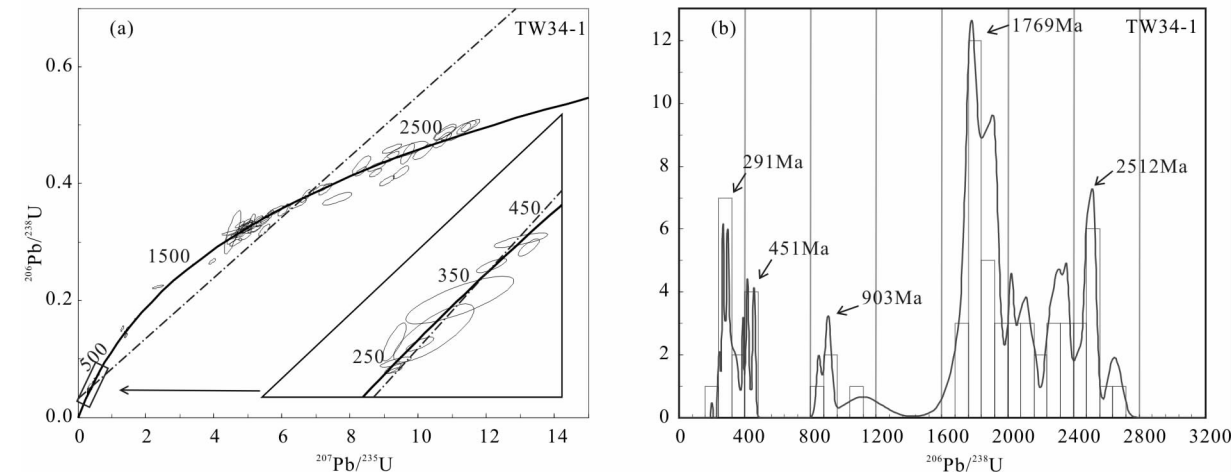


图 5 (a)隆务河组砂岩样品(TW34-1)锆石 U-Pb 年龄谐和图和(b)年龄分布直方图

Fig. 5 (a) The Longwuhe Formation rock samples(TW34-1) detrital zircons U-Pb concordia diagrams and (b)histograms

外貌特征, 锆石颗粒长度为 70~240 μm, 宽度为 45~80 μm, 长宽比为 1:1~1:3。锆石阴极反光 (CL)显微图像上显示多数锆石具有典型的岩浆振荡环带和明暗相间的条带状构造, 表明其应为岩浆结晶的产物(如测点 21、26、76、43、53、36、85、83、23、70 等); 部分锆石具有较完整的晶型, 呈次圆-圆状, 但阴极发光 (CL) 显微照片显示整体的灰-灰白色, 这类锆石可能是由于脱晶化作用形成的锆石(如测点 3)。以上多重成因类型的锆石, 反映出物源区类型的多样性和复杂性(图 6)。

依据隆务河组岩屑长石砂岩同位素年龄样品 (TW64-1)85 个测点(表 3), 73 颗落在谐和线上或

其附近。样品 TW64-1 中锆石 Pb 含量为 $43.07 \times 10^{-6} \sim 3480.49 \times 10^{-6}$, Th 含量为 $20.77 \times 10^{-6} \sim 718.11 \times 10^{-6}$, U 含量为 $18.13 \times 10^{-6} \sim 503.01 \times 10^{-6}$, Th/U 值为 0.15~5.02, 所有锆石的 Th/U 值大于 0.1。结合锆石 Th/U 值, 表明这些锆石颗粒大多都属于岩浆成因(HOSKIN, 2003)。此次所测锆石年龄范围为 271~2 669 Ma。从锆石 U-Pb 年龄直方图可以看出(图 7), 隆务河组样品 TW64-1 碎屑锆石年龄可区分为 3 组: 271~379 Ma, 共计 13 颗, 占比 17.8%(73); 450~474 Ma, 共计 2 颗, 占比 2.7%(73); 1 743~2 669 Ma, 共计 58 颗, 占比 79.5%(73)。

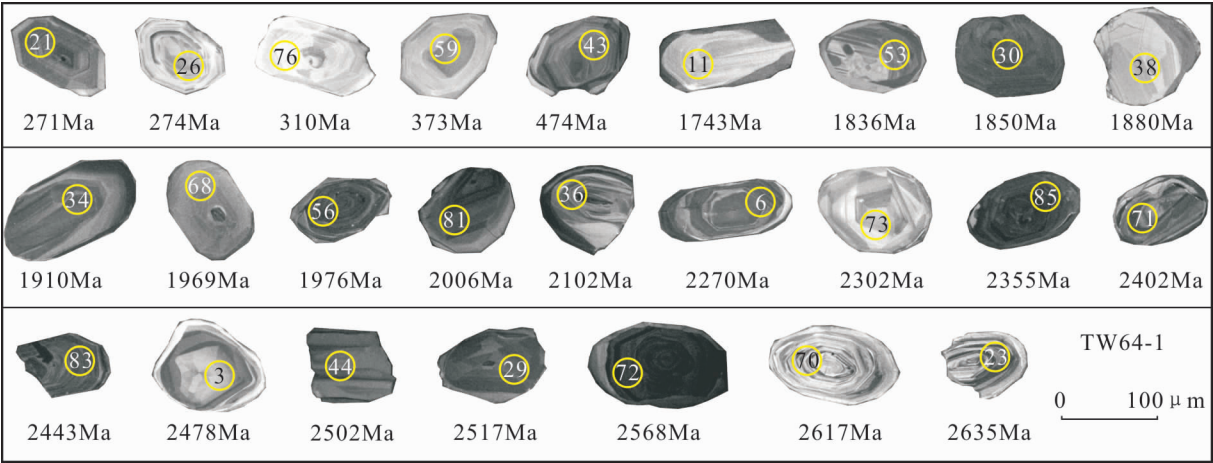


图 6 隆务河组样品(TW64-1)代表性锆石阴极发光图像及年龄图

Fig. 6 Cathodoluminescence (CL) images and ages of single zircon from the Longwuhe Formation rock samples (TW64-1)

表 3 隆务河组砂岩样品 (TW64-1) LA-ICP-MS 年龄测试数据表
Tab. 3 LA-ICP-MS age test data of Longwuhe Formation sandstone sample (TW64-1)

测点	元素含量(10 ⁻⁶)				同位素比值								同位素年龄(Ma)				优选
	Pb	Th	U	Th/U	207Pb/206Pb				207Pb/235U				207Pb/206Pb				1σ
					1σ	207Pb/235U	1σ	206Pb/238U	1σ	207Pb/235U	1σ	207Pb/206Pb	1σ	207Pb/235U	1σ	206Pb/238U	
TW64-1-21	157.91	239.16	297.40	0.80	0.052 0	0.002 1	0.306 1	0.011 2	0.042 9	0.000 9	283	91	271	9	271	6	271 6
TW64-1-69	268.74	414.23	257.25	1.61	0.053 3	0.001 9	0.319 2	0.011 1	0.043 3	0.000 5	343	80	281	9	274	3	274 3
TW64-1-26	79.92	119.96	133.24	0.90	0.054 3	0.002 3	0.323 4	0.013 8	0.043 4	0.000 8	383	96	284	11	274	5	274 5
TW64-1-65	124.55	184.67	281.21	0.66	0.052 3	0.001 6	0.314 6	0.009 7	0.043 5	0.000 5	298	69	278	7	274	3	274 3
TW64-1-08	163.72	223.51	255.25	0.88	0.051 0	0.001 8	0.326 4	0.011 0	0.047 0	0.001 1	239	75	287	8	296	7	296 7
TW64-1-40	100.74	136.08	133.94	1.02	0.051 9	0.002 2	0.344 3	0.014 3	0.047 0	0.000 7	280	96	300	11	296	4	296 4
TW64-1-04	261.33	355.69	205.27	1.73	0.051 5	0.002 0	0.340 2	0.013 3	0.047 8	0.000 6	265	89	297	10	301	4	301 4
TW64-1-32	202.29	278.21	213.48	1.30	0.049 8	0.001 9	0.335 1	0.011 9	0.048 1	0.000 7	183	119	293	9	303	4	303 4
TW64-1-76	57.60	78.09	73.52	1.06	0.050 5	0.002 6	0.343 7	0.016 6	0.049 3	0.000 8	217	119	300	13	310	5	310 5
TW64-1-45	244.31	339.04	325.29	1.04	0.053 0	0.001 7	0.363 7	0.010 9	0.049 6	0.000 5	328	70	315	8	312	3	312 3
TW64-1-51	106.46	126.41	154.93	0.82	0.054 8	0.002 2	0.395 5	0.015 8	0.052 2	0.000 9	467	89	338	12	328	5	328 5
TW64-1-59	424.63	489.71	190.67	2.57	0.056 3	0.001 6	0.464 2	0.013 8	0.059 6	0.000 7	465	65	387	10	373	5	373 5
TW64-1-28	337.35	369.48	249.67	1.48	0.054 3	0.001 7	0.455 2	0.014 7	0.060 6	0.000 8	389	64	381	10	379	5	379 5
TW64-1-01	43.07	37.91	47.38	0.80	0.053 0	0.003 3	0.528 4	0.030 5	0.072 3	0.001 5	332	141	431	20	450	9	450 9
TW64-1-43	140.48	120.33	139.74	0.86	0.054 7	0.001 7	0.575 4	0.017 6	0.076 3	0.001 1	398	77	462	11	474	6	474 6
TW64-1-11	98.47	20.77	18.13	1.15	0.106 6	0.004 1	4.575 6	0.162 2	0.315 3	0.006 0	1 743	69	1 745	30	1 767	30	1 743 69
TW64-1-54	631.25	130.02	100.92	1.29	0.108 9	0.002 6	5.207 0	0.127 1	0.346 1	0.004 9	1 781	47	1 854	21	1 916	24	1 781 47
TW64-1-10	393.95	63.92	395.93	0.16	0.111 0	0.002 6	5.205 7	0.124 6	0.340 4	0.004 7	1 817	43	1 854	20	1 889	23	1 817 43
TW64-1-12	789.11	159.96	268.05	0.60	0.111 2	0.002 3	5.345 2	0.114 0	0.348 9	0.005 3	1 820	37	1 876	18	1 929	25	1 820 37
TW64-1-53	649.03	128.43	166.01	0.77	0.112 2	0.002 7	5.402 5	0.139 9	0.346 9	0.004 2	1 836	44	1 885	22	1 920	20	1 836 44
TW64-1-30	759.50	135.73	378.40	0.36	0.113 1	0.002 4	5.436 6	0.113 9	0.346 8	0.004 6	1 850	39	1 891	18	1 919	22	1 850 39
TW64-1-41	205.63	40.87	58.09	0.70	0.114 6	0.002 8	5.664 5	0.131 5	0.357 6	0.005 1	1 873	44	1 926	20	1 971	24	1 873 44
TW64-1-02	1 410.22	376.30	345.33	1.09	0.114 7	0.003 6	5.141 6	0.201 2	0.324 2	0.008 6	1 876	56	1 843	33	1 810	42	1 876 56
TW64-1-38	625.99	124.66	88.86	1.40	0.114 9	0.002 2	5.715 3	0.108 3	0.358 3	0.004 1	1 880	35	1 934	16	1 974	19	1 880 35

测点	元素含量(10 ⁻⁶)					同位素比值										同位素年龄(Ma)				优选
	Pb	Th	U	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ				年龄
TW64-1-62	486.86	89.51	246.40	0.36	0.115 8	0.002 3	5.598 2	0.114 4	0.350 1	0.004 1	1 892	35	1 916	18	1 935	20				1 892 35
TW64-1-22	1 155.65	231.28	156.79	1.48	0.115 7	0.002 9	5.412 4	0.139 6	0.339 3	0.004 2	1 900	44	1 887	22	1 883	20				1 900 44
TW64-1-34	520.10	89.64	274.75	0.33	0.117 0	0.002 1	5.970 0	0.110 1	0.367 2	0.004 2	1 910	31	1 971	16	2 016	20				1 910 31
TW64-1-63	531.24	100.30	219.89	0.46	0.118 4	0.002 3	5.681 3	0.115 1	0.346 8	0.003 9	1 932	34	1 929	18	1 919	19				1 932 34
TW64-1-37	574.08	105.68	338.78	0.31	0.118 7	0.004 6	5.984 4	0.252 5	0.362 8	0.005 1	1 939	70	1 974	37	1 995	24				1 939 70
TW64-1-68	604.68	118.62	81.09	1.46	0.120 7	0.002 7	5.969 8	0.142 9	0.357 2	0.005 0	1 969	39	1 971	21	1 969	24				1 969 39
TW64-1-56	898.43	196.01	425.05	0.46	0.121 3	0.002 4	5.713 4	0.119 3	0.340 1	0.003 9	1 976	34	1 933	18	1 887	19				1 976 34
TW64-1-60	330.83	65.00	38.66	1.68	0.122 3	0.003 1	6.314 4	0.168 9	0.373 4	0.004 9	1 990	44	2 020	23	2 046	23				1 990 44
TW64-1-20	1 227.20	272.36	386.72	0.70	0.122 2	0.004 4	6.079 5	0.208 6	0.363 1	0.005 4	1 991	65	1 987	30	1 997	26				1 991 65
TW64-1-78	444.88	76.98	503.01	0.15	0.122 6	0.002 3	5.769 9	0.123 9	0.340 1	0.004 4	1 995	33	1 942	19	1 887	21				1 995 33
TW64-1-61	735.58	160.76	376.13	0.43	0.122 8	0.002 5	5.595 0	0.119 3	0.330 4	0.004 4	1 998	36	1 915	18	1 840	21				1 998 36
TW64-1-81	392.67	76.43	266.66	0.29	0.123 4	0.003 1	5.759 0	0.147 4	0.338 5	0.004 2	2 006	44	1 940	22	1 879	20				2 006 44
TW64-1-18	339.05	53.32	252.80	0.21	0.124 0	0.002 8	6.245 0	0.155 0	0.364 6	0.004 6	2 017	39	2 011	22	2 004	22				2 017 39
TW64-1-49	647.34	100.11	361.04	0.28	0.130 3	0.005 3	6.941 6	0.259 8	0.385 1	0.004 2	2 102	71	2 104	33	2 100	20				2 102 71
TW64-1-36	379.10	64.51	120.58	0.54	0.130 3	0.002 3	7.232 3	0.125 2	0.400 2	0.004 8	2 102	30	2 140	16	2 170	22				2 102 30
TW64-1-07	575.49	88.31	120.11	0.74	0.137 5	0.003 0	8.439 2	0.187 4	0.445 1	0.005 7	2 195	38	2 279	20	2 373	25				2 195 38
TW64-1-06	2 911.43	464.98	302.47	1.54	0.143 5	0.003 2	8.834 6	0.211 3	0.445 2	0.005 7	2 270	39	2 321	22	2 374	26				2 270 39
TW64-1-73	1 026.99	182.76	183.93	0.99	0.146 1	0.003 2	8.186 3	0.191 1	0.404 0	0.005 0	2 302	38	2 252	21	2 187	23				2 302 38
TW64-1-55	621.70	94.90	124.78	0.76	0.146 6	0.003 1	9.168 7	0.196 8	0.452 0	0.004 8	2 306	36	2 355	20	2 404	21				2 306 36
TW64-1-64	274.27	44.58	47.36	0.94	0.147 2	0.003 4	8.561 2	0.201 4	0.420 9	0.005 0	2 313	40	2 292	21	2 265	23				2 313 40
TW64-1-67	1 367.96	269.08	347.98	0.77	0.147 1	0.003 2	8.302 8	0.197 5	0.406 9	0.005 2	2 322	37	2 265	22	2 201	24				2 322 37
TW64-1-52	691.38	100.80	187.15	0.54	0.149 4	0.003 8	9.842 5	0.248 9	0.476 5	0.006 4	2 339	44	2 420	23	2 512	28				2 339 44
TW64-1-85	2 163.24	355.30	384.99	0.92	0.150 8	0.003 5	9.377 9	0.213 2	0.450 9	0.005 7	2 355	40	2 376	21	2 399	25				2 355 40
TW64-1-50	1 269.19	195.43	147.66	1.32	0.150 9	0.004 1	9.508 1	0.257 6	0.454 8	0.005 6	2 367	46	2 388	25	2 416	25				2 367 46
TW64-1-46	1 717.60	258.53	277.45	0.93	0.154 2	0.003 3	9.863 9	0.205 5	0.461 9	0.005 9	2 394	31	2 422	19	2 448	26				2 394 31

续表 3

测点	元素含量(10^{-6})			同位素比值								同位素年龄(Ma)				优选	
	Pb	Th	U	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	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	年龄	
TW64-1-1-71	528.38	104.65	307.00	0.34	0.155 0	0.003 9	8.784 8	0.246 5	0.407 6	0.006 3	2.402	49	2.316	26	2.204	29	2 402 49
TW64-1-1-09	1 219.69	170.64	132.69	1.29	0.155 8	0.003 2	10.561 4	0.228 8	0.491 8	0.007 3	2.410	40	2.485	20	2.578	32	2 410 40
TW64-1-1-75	3 480.49	718.11	413.78	1.74	0.156 7	0.003 0	9.107 9	0.186 9	0.419 5	0.004 8	2.421	33	2.349	19	2.258	22	2 421 33
TW64-1-1-74	1 586.51	242.16	323.38	0.75	0.157 5	0.003 2	9.919 8	0.199 0	0.455 5	0.005 2	2.429	35	2.427	19	2.420	23	2 429 35
TW64-1-1-83	962.12	146.74	165.75	0.89	0.158 7	0.003 0	9.522 1	0.194 6	0.434 8	0.005 6	2.443	32	2.390	19	2.328	25	2 443 32
TW64-1-1-19	794.54	105.47	163.77	0.64	0.160 3	0.004 6	10.036 6	0.294 1	0.455 8	0.006 6	2.459	48	2.438	27	2.421	29	2 459 48
TW64-1-1-05	1 790.49	278.69	195.86	1.42	0.160 9	0.003 9	10.565 7	0.273 2	0.474 6	0.005 8	2.465	41	2.486	24	2.503	25	2 465 41
TW64-1-1-03	592.91	82.26	131.42	0.63	0.161 0	0.004 6	10.712 0	0.329 1	0.481 0	0.007 2	2.478	48	2.498	29	2.531	32	2 478 48
TW64-1-1-13	1 165.05	160.44	137.78	1.16	0.162 1	0.003 2	11.252 2	0.260 5	0.501 7	0.007 2	2.480	33	2.544	22	2.621	31	2 480 33
TW64-1-1-47	2 100.62	322.27	64.23	5.02	0.163 7	0.003 9	11.024 5	0.254 9	0.486 7	0.006 1	2.494	40	2.525	22	2.556	27	2 494 40
TW64-1-1-17	764.60	107.23	183.66	0.58	0.163 8	0.003 5	10.604 7	0.245 0	0.469 1	0.005 4	2.495	36	2.489	22	2.479	24	2 495 36
TW64-1-1-44	237.62	31.17	39.99	0.78	0.164 3	0.003 4	11.724 5	0.274 6	0.514 3	0.008 0	2.502	35	2.583	22	2.675	34	2 502 35
TW64-1-1-57	546.69	80.56	77.46	1.04	0.164 6	0.003 5	11.234 6	0.247 1	0.494 7	0.006 3	2.503	36	2.543	21	2.591	27	2 503 36
TW64-1-1-39	1 430.59	201.72	221.40	0.91	0.165 0	0.003 0	11.607 5	0.208 9	0.506 8	0.006 4	2.509	31	2.573	17	2.643	27	2 509 31
TW64-1-1-29	1 677.99	249.44	175.34	1.42	0.165 9	0.003 4	11.215 9	0.232 9	0.487 7	0.006 3	2.517	34	2.541	19	2.561	27	2 517 34
TW64-1-1-82	622.12	99.70	127.84	0.78	0.167 9	0.003 3	11.056 2	0.226 3	0.476 8	0.005 4	2.539	32	2.528	19	2.513	24	2 539 32
TW64-1-1-58	894.73	132.49	190.86	0.69	0.168 8	0.003 3	11.175 8	0.223 2	0.480 0	0.005 9	2.546	38	2.538	19	2.527	26	2 546 38
TW64-1-1-72	1 024.67	157.38	213.92	0.74	0.171 1	0.003 9	11.178 9	0.252 9	0.472 1	0.005 9	2.568	38	2.538	21	2.493	26	2 568 38
TW64-1-1-66	848.92	125.56	103.15	1.22	0.172 5	0.003 5	11.595 5	0.244 0	0.485 8	0.006 0	2.582	33	2.572	20	2.552	26	2 582 33
TW64-1-1-24	1 753.39	277.12	202.37	1.37	0.173 1	0.003 7	11.396 3	0.258 9	0.476 5	0.005 6	2.587	41	2.556	21	2.512	25	2 587 41
TW64-1-1-70	1 015.86	148.29	146.31	1.01	0.176 2	0.004 3	11.985 3	0.290 0	0.491 2	0.006 2	2.617	41	2.603	23	2.576	27	2 617 41
TW64-1-1-48	1 225.14	175.76	143.97	1.22	0.176 5	0.004 2	12.191 7	0.283 7	0.498 6	0.005 9	2.621	40	2.619	22	2.608	25	2 621 40
TW64-1-1-23	1 450.57	212.67	280.61	0.76	0.177 9	0.004 0	11.944 4	0.285 3	0.487 1	0.006 8	2.635	38	2.600	22	2.558	30	2 635 38
TW64-1-1-33	177.30	23.13	34.60	0.67	0.181 7	0.004 6	13.452 5	0.282 0	0.530 3	0.006 8	2.669	41	2.712	20	2.743	29	2 669 41

注:分析测试采用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,分析仪器为 Elan 6100DRC 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nmArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 30 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm 。采用年龄为 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,其加权平均值具有 95% 的置信度。

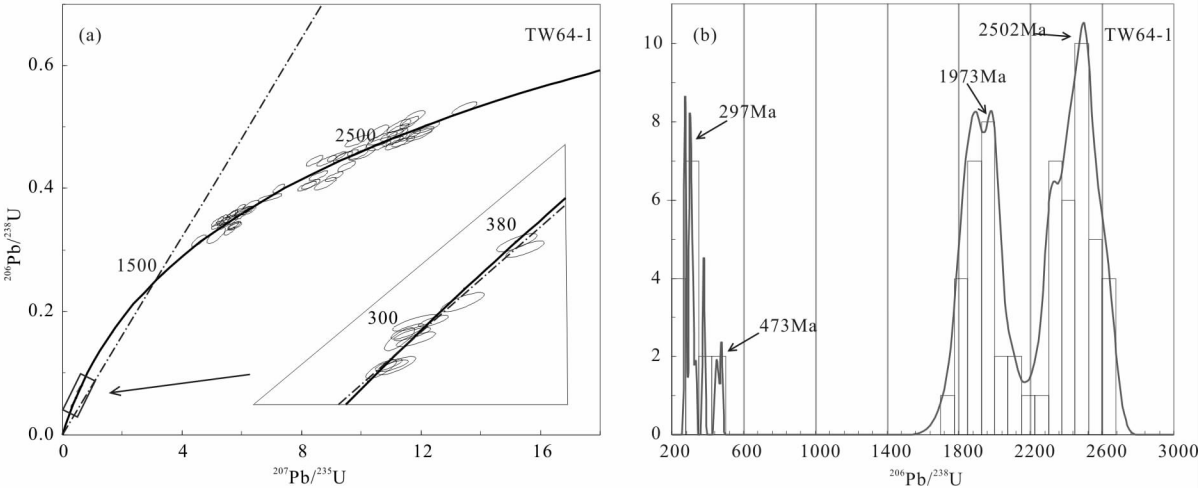


图 7 (a)隆务河组砂岩样品(TW64-1)钻石 U - Pb 年龄谐和图和(b)年龄分布直方图

Fig. 7 (a) The Longwuhe Formation rock samples(TW64-1) detrital zircons U - Pb concordia diagrams and (b)histograms

5 讨论

5.1 碎屑锆石物源分析

5.1.1 古元古代—新太古代末期年龄信息

在隆务河组 2 个研究样品中,1 701~2 672 Ma 年龄组共计 106 颗,占隆务河组样品总量的 77.4% (137),该期年龄占比最大,指示了隆务河组碎屑沉积物质的主要来源,同时也说明西秦岭地区在古元古代—新太古代时期古老基底剥蚀裸露面积可能日益增大。

古元古代早期—新太古代时期,华北克拉通基底的形成及演化与西秦岭及邻近地区广泛分布的 TTG 岩系(英云闪长岩-奥长花岗岩-花岗闪长岩)以及镁铁质麻粒岩系的岩浆作用及跟随其后的变质作用密切相关。耿元生等(2002)认为华北克拉通在前寒武纪时期存在 2 个主要火山活动峰期(2.5 Ga 和 2.7 Ga);GENG et al. (2006)及 GRANT et al. (2009)分别在华北地区 TTG 岩系获得 SHRIMP 锆石 U - Pb 年龄为~2.5 Ga,并且在小于 50 Ma 之后发生不同程度变质作用。何艳红等(2005)在秦祁结合地区陇山岩群花岗质片麻岩中获得年龄峰值为 1.90 Ga、2.35 Ga、2.50 Ga,并认为对应区域上 3 期岩浆事件;沈其韩等(2005)对华北板块早前寒武纪研究认为,该区域在 2.5~2.55 Ga 期间存在一次较为强烈的岩浆事件;裴先治等(2007d)在西秦岭葫

芦河群变质砂岩中获得 2 302~2 578 Ma 的碎屑锆石年龄,认为可能存在古元古代—新太古代结晶基底岩石。

隆务河组砂岩主体为比较古老的碎屑锆石颗粒(>1 600 Ma),主要集中在古元古代—新太古代,说明该时期蚀源区古老基底剥蚀范围逐渐增大,虽然存在同时代的火成岩提供沉积物质的现象,但根据同时代锆石颗粒的数量及分布特点,表明同时代的火成岩对沉积岩的贡献是有限的,而且在隆务河组碎屑锆石样中,中—新元古代和古生代锆石的占比很小。

综合上述资料与碎屑锆石年龄对应关系表明,隆务河组中 1 701~2 672 Ma 年龄组的碎屑锆石年龄的出现,证实了华北板块、祁连造山带和西秦岭造山带古老基底岩石存在为隆务河组沉积提供物源的可能性,并且为西秦岭地区隆务河组沉积地层最主要的物源区。

5.1.2 新元古代早期—中元古代末期年龄信息

新元古代—中元古代末期受全球 Rodinia 超大陆汇聚与裂解与 Grenville 造山事件的影响,祁连造山带与西秦岭北缘构造带产生一系列构造岩浆活动(裴先治等,2012)。在隆务河组的 2 个碎屑锆石研究样品中,848~1 115 Ma 年龄组共计 4 颗锆石年龄,该期年龄所占比例较小,仅占隆务河组样品总量的 2.9%(137),该年龄组代表了新元古代早期—中元古代末期构造岩浆热事件的年龄谱。

张志国等(2011)在水地区木其滩岩组中斜长角闪岩获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(762.5 ± 4.6)Ma,并认为该斜长角闪岩为商丹洋洋壳残片,该年龄代表 Rodinia 超大陆裂解导致商丹洋壳初始裂解时期;裴先治等(2007b)在元龙花岗质片麻岩和新阳花岗质片麻岩获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄(914.7 ± 7.6)Ma、(935.5 ± 3.1)Ma、(978.5 ± 4.8)Ma,反映了该区新元古代早期确实发生过岩浆活动、俯冲碰撞及陆块汇聚作用,可能是 Rodinia 超大陆汇聚事件在中国西北地区的响应,代表了西秦岭北缘晋宁造山(碰撞)拼合事件。另外,郭进京等(1999)、王洪亮等(2007)研究表明祁连造山带东段同样存在中一新元古代时期岩浆活动。

扬子板块北缘同样存在大量中一新元古代锆石年龄的证据(闫全人等,2007;徐通等,2016),但笔者并不认为扬子板块北缘为该区中生代沉积地层提供物质,自晚古生代之后,区域上呈北高南低,且西秦岭及其邻区地层的古流向呈由北向南(闫臻等,2002;徐亚军,2009)。另外,受 Rodinia 超大陆聚合阶段(800~1 000 Ma)和裂解阶段(700~800 Ma)(裴先治等,2012)的影响,扬子板块北缘为其提供物质的可能性更小。故笔者认为西秦岭隆务河组新元古代早期—中元古代末期碎屑锆石年龄(848~1 115 Ma)正是 Rodinia 超大陆汇聚事件的响应,西秦岭北缘构造带与祁连造山带中东段历史时期的构造岩浆事件与隆务河组碎屑锆石年龄频谱峰值存在较好对应关系,反映了沉积物主要是由西秦岭北缘构造带和祁连造山带中东段所提供的可能性,但贡献量依然有限。

5.1.3 加里东期年龄信息

在隆务河组的2个碎屑锆石研究样品中,448~474 Ma 年龄组共计4颗锆石年龄,该期年龄所占比例较小,仅占隆务河组样品总量的2.9%(137),该年龄组代表了早古生代构造岩浆热事件的年龄谱。

该年龄组反映的年龄信息很可能与早古生代西秦岭微板块向北俯冲和祁连造山带碰撞而产生的一系列构造-岩浆活动具相关性。前人对北祁连造山带东段加里东期岩浆活动的侵位时限研究得到了诸多成果。陇山地区铁佛寺乡扫帚沟和关山沟的两条基性岩墙,锆石 U-Pb 年龄分别为(442.8 ± 11)Ma 和(440 ± 1.7)Ma(陈隽璐等,2006);魏方辉等

(2012)在水地区黄门川花岗闪长岩中获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为(440.5 ± 4.4)Ma;裴先治等(2007a)和 ZHANG et al.(2006)在祁连造山带东段阎家店闪长岩体获得 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄分别为(440.2 ± 0.92)Ma 和(441 ± 10)Ma。

西秦岭北缘构造带在早古生代时期岩浆活动复杂,并广泛发育俯冲-碰撞型花岗质岩浆岩。如王婧等(2008)在党川花岗岩体获得锆石 U-Pb 年龄为(438 ± 3)Ma;裴先治等(2007c)在李子园地区辉长岩获得锆石 U-Pb 年龄为(449.7 ± 3.1)Ma;王洪亮等(2007)在草滩沟群变质中基性火山岩获得锆石 U-Pb 年龄为(456 ± 5)Ma;天水地区关子镇辉长岩锆石 U-Pb 年龄为(471.1 ± 1.4)Ma(杨钊等,2006)。

上述资料与碎屑锆石年龄对应关系表明,448~474 Ma 年龄组的碎屑锆石年龄的出现,证实了祁连造山带和西秦岭造山带北缘存在为隆务河组沉积提供物源的可能性,但其贡献量很有限,并未大规模提供物质成分。

5.1.4 华力西期年龄信息

在隆务河组的2个碎屑锆石研究样品中,259~418 Ma 年龄组共计23颗锆石年龄,占隆务河组样品总量的16.8%(137),该年龄组代表了中生代早期—晚古生代构造岩浆热事件的年龄谱。该组碎屑锆石可能与该时期西秦岭地区伸展裂陷的地质背景相关,在北秦岭、中秦岭及邻区一带均有大量晚古生代岩浆岩的分布,很可能是该年龄段的锆石来源。徐学义等(2014)对西秦岭中川、江里沟花岗岩体进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学研究,其加权平均年龄为(264.4 ± 1.3)Ma、(264 ± 1.4)Ma;丁仁平等(2009)在西秦岭新阳-元龙剪切带中获得花岗质糜棱岩黑云母 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄分别为(347.95 ± 2.17)Ma 和(351.70 ± 1.72)Ma。

上述资料与本次研究的碎屑锆石年龄对应关系表明,259~418 Ma 年龄组的碎屑锆石年龄与西秦岭构造带的晚古生代岩浆构造热事件具一定相关性。

综上所述,从目前资料来看,西秦岭临潭地区隆务河组碎屑岩的物源主要源自华北板块、北秦岭造山带、祁连造山带古老的火山岩石基底,并且晚古生代北秦岭和中秦岭在区域伸展裂陷背景下的构造-

岩浆热事件也是隆务河组碎屑岩提供了较年轻的碎屑成分。

5.2 沉积时代

研究区隆务河组砂岩地处西秦岭造山带南侧临潭地区,本此研究通过 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年代学测试方法在隆务河组砂岩层中获得碎屑锆石最小年龄为 259 Ma,说明研究区该套隆务河组砂岩的沉积时代不早于晚二叠世(259~252 Ma)。结合前人所发现的菊石、双壳类和牙形虫等化石资料(甘肃地质调查院,2007;武警黄金部队,2017),笔者认为隆务河组主体沉积时代应为早三叠世。

5.3 沉积环境及构造背景

研究区隆务河组主要沉积于合作-岷县断裂以南,其北侧未出现大规模三叠纪地层沉积,依据研究区隆务河组沉积地层岩性及岩石组合、层序特点,隆务河组各段韵律沉积较为明显,整体为一套砂岩-粉砂岩-钙、泥质粉砂岩-灰岩的韵律型沉积序列。下段厚层砂岩较多,以巨厚层-厚层为宏观露头;中段砂岩减少,粉砂岩增多;上段偶夹薄层细砂岩,多为粉砂岩。不同程度发育一系列完整或不完整的鲍马层序,同时结合西秦岭地区三叠系总体特征,认为隆务河组沉积时为水动力条件较强、陆源碎屑物较充足的半深海大陆斜坡相浊流沉积体系,自下而上岩层粒度总体变细、层厚变薄,海水呈加深趋势,暗示了浊积扇由内向外的过渡,推测西秦岭地区在三叠纪总体为半深海-浅海相沉积环境。

从砂岩样品地球化学主、微量元素特点来看,研究区隆务河组砂岩主量元素特征对比不同构造背景砂岩参数(BHATIA,1983;BHATIA et al.,1986),隆务河组砂岩样品的各项参数大多介于活动大陆边缘和大陆岛弧之间(表 4)。砂岩样品在 K₂O/Na₂O-SiO₂ 图解中落点较分散,主体集中在活动大陆边

缘(ACM)和大洋岛弧(ARC)界线附近(图 8a),在 SiO₂/Al₂O₃-K₂O/Na₂O 图解中落点以活动大陆边缘区域(ACM)为主,少数落入被动大陆边缘区域(图 8b),总体呈现为在活动大陆边缘区域投点均较为集中。另外,样品在 Th-Co-Zr/10 图解中样品点主体落在大陆岛弧(图 9a);Th-Sc-Zr/10 图解中样品点主体落在大陆岛弧(图 9b);Sc-La-Th 图解中全部落入大陆岛弧、活动大陆边缘与被动大陆边缘(图 9c)。综上所述,推断隆务河组砂岩的主要物源来自大陆岛弧或者活动大陆边缘。故认为,研究区隆务河盆地应为伸展裂陷背景下发育而成的活动大陆边缘沉积盆地,隆务河组砂岩碎屑物源区为与俯冲-造山带有关并形成于大陆弧构造环境的岩浆岩;从碎屑锆石 U-Pb 年代学角度,表明祁连造山带、西秦岭造山带北缘以及华北板块南缘的基底抬升剥蚀可能为隆务河组沉积提供了主要碎屑物源,并以祁连造山带居多,西秦岭造山带北缘及华北板块南缘兼有,源区物质主要为具有活动大陆边缘性质的岩浆岩、早期地层及古老基底岩石。两者所反映的特征基本一致。区域上,整个秦岭地区及其邻近区域受古特提斯洋扩张的影响,勉-略洋于泥盆纪打开(张国伟等,2015;WU et al.,2013)。在区域伸展-拉张的构造背景下,认为在石炭纪一早二叠世为勉-略洋盆扩张程度最大阶段,后于晚古生代末期逐渐进入俯冲消减阶段(张国伟等,2003,2015;赖绍聪等,2002;董云鹏等,2007),西秦岭地区应处于活动大陆边缘环境。综上推断,研究区于晚古生代末期一中生代早期随着扬子板块向西秦岭微板块持续俯冲,致使西秦岭造山带构造活动加剧,因此该阶段沉积盆地应该处于俯冲背景下的局部伸展-扩张阶段,盆地原型可能为弧后裂陷盆地(LI et al.,2014)。

表 4 隆务河组砂岩与不同构造背景杂砂岩主量元素特征数值比较表

Tab. 4 Comparison of the characteristics of major elements of the Longwuhe Formation sandstones with the graywackes from various tectonic settings

采样组别	SiO ₂	TiO ₂	TFe ₂ O ₃ +MgO	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	Al ₂ O ₃ /(CaO+Na ₂ O)
隆务河(平均)	65.43	0.63	7.33	0.19	3.64	1.37
大洋岛弧	58.83	1.06	11.70	0.29	0.39	1.72
大陆岛弧	70.69	0.64	6.79	0.20	0.61	2.42
活动大陆边缘	73.86	0.46	4.63	0.18	0.99	2.56
被动大陆边缘	81.95	0.49	2.89	0.10	1.60	4.15

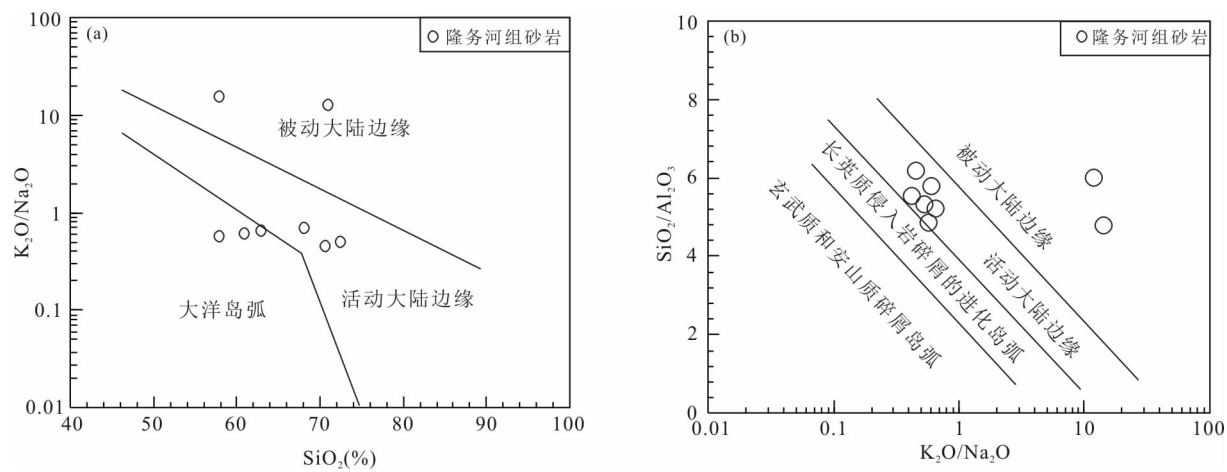
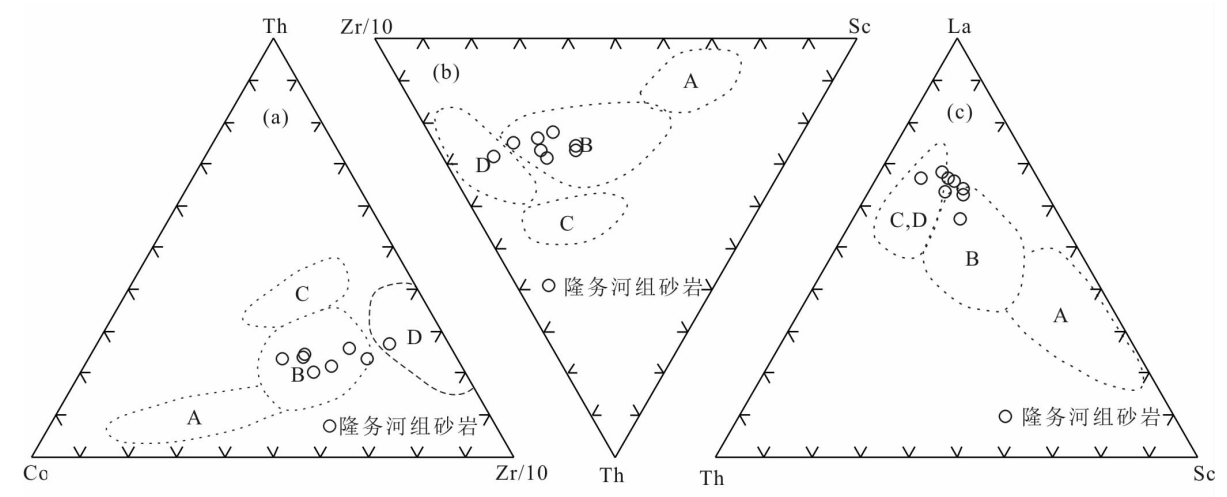


图 8 (a)隆务河组砂岩 $K_2O/Na_2O - SiO_2$ (据 ROSE et al. ,1986)和(b) $SiO_2/Al_2O_3 - K_2O/Na_2O$ (据 MAVNARD et al. ,1982)构造环境判别图

Fig. 8 (a)The $K_2O/Na_2O - SiO_2$ and (b) $SiO_2/Al_2O_3 - K_2O/Na_2O$ Tectonic environment discrimination map of the Longwuhe Formation sandstone



A. 大洋岛弧;B. 大陆岛弧;C. 活动大陆边缘;D. 被动大陆边缘

图 9 (a)隆务河组砂岩 $Th - Co - Zr/10$ 、(b) $Th - Sc - Zr/10$ 和 (c) $Sc - La - Th$ 源区判别图解

Fig. 9 (a)The $Th - Co - Zr/10$ (a), (b) $Th - Sc - Zr/10$ and (c) $Sc - La - Th$ Tectonic environment discrimination map of the Longwuhe Formation sandstone

6 结论

(1)通过年代学研究获得的隆务河组砂岩碎屑锆石 U - Pb 最小年龄 259Ma 可能代表该套地层沉积下限,将其沉积时代厘定为早三叠世。

(2)根据沉积岩岩石组合及沉积环境认为隆务河组总体发育一系列完整或不完整的鲍马层序,具有典型半深海大陆斜坡相浊流沉积体系特

征,自下段到上段应是浊积扇由内向外过渡过程的体现。

(3)隆务河组碎屑岩物源具多元性特征,其物源总体来自盆地北侧,包括华北板块、西秦岭造山带北缘、祁连造山带东段,其中华北板块古老基底岩石是研究区隆务河组的主要物源区。

(4)结合地球化学特征推断,研究区隆务河组砂岩主体形成于活动大陆边缘构造背景下扩张阶段的弧后裂陷盆地。

参考文献(References):

- 陈隽璐,何世平,王洪亮,等. 秦岭祁连造山带接合部位基性岩墙的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石矿物学杂志,2006,25(6):456-462.
- CHEN Junlu, HE Shiping, WANG Hongliang, et al. Zircon LA-ICPMS U-Pb age of mafic dykes in the area between the Qinling and the Qilian orogenic belt and its geological implications[J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2006, 25(6):456-462.
- 丁仁平,裴先治,李勇,等. 西秦岭北缘新阳—元龙韧性剪切带中花岗岩质糜棱岩黑云母⁴⁰Ar-³⁹Ar 年龄及地质意义[J]. 地质学报,2009,83(11):1624-1632.
- DING Sanping, PEI Xianzhi, LI yong, et al. Biotite⁴⁰Ar-³⁹Ar Ages of Granitic Mylonite at the Xinyang-Yuanlong Ductile Shear Zone in the North Margin of West Qinling and Their Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica,2009,83(11):1624-1632.
- 董云鹏,张国伟,杨钊,等. 西秦岭武山 E-MORB 型蛇绿岩及相关火山岩地球化学[J]. 中国科学(D 辑),2007,37:199-208.
- DONG Yunpeng, ZHANG Guowei, YANG Zhao, et al. Geochemistry of E-MORB ophiolite and related volcanic rocks in Wushan, Western Qinling [J]. Science in China(Series D:Earth Sciences), 2007, 37: 199-208.
- 冯益民,曹宣铎,张二朋,等. 西秦岭造山带的演化、构造格局和性质[J]. 西北地质,2003,36(1):1-10.
- FENG Yimin, CAO Xuanze, ZHANG Erpeng, et al. Tectonic evolution framework and nature of the west Qingling orogenic belt[J]. Northwestern Geology, 2003, 36(1): 1-10.
- 耿元生,万渝生,沈其韩. 华北克拉通早前寒武纪基性火山作用与地壳增生[J]. 地质学报, 2002, 76(02): 199-208.
- GENG Yuansheng, WAN Yusheng, SHEN Qihan. Early Precambrian Basic Volcanism and Crustal Growth in the North China Craton[J]. Acta Geologica Sinica,2002,76(02):199-208.
- 郭进京,赵风清,李怀坤. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义[J]. 地球学报,1999,20(1):10-15.
- GUO Jinjing, ZHAO Fengqing, LI Huaikun. Jinningian Collisional Granite Belt in the Eastern Sector of the Central Qilian Massif and Its Implication [J]. Acta Geoscientia Sinica,1999,20(1):10-15.
- 何艳红,孙勇,陈亮,等. 陇山杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 岩石学报,2005b,21(1):125-134.
- HE Yanhong, SUN Yong, CHEN Liang, et al. Zircon U-Pb chronology of Longshan complex by LA-ICP-MS and its geological significance [J]. Acta Petrologica Sinica,2005,21(1):125-134.
- 金维浚,张旗,何登发,等. 西秦岭埃达克岩的 SHRIMP 定年及其构造意义[J]. 岩石学报,2005,21(3):959-966.
- JIN Weijun, ZHANG Qi, HE Dengfa, et al. SHRIMP dating of adakites in western Qinling and their implications[J]. Acta Petrologica Sinica,2005,21(3):959-966.
- 赖绍聪,张国伟,裴先治,等. 南秦岭勉略结合带琵琶寺洋壳蛇绿岩的厘定及其大地构造意义[J]. 地质通报,2002,21(8-9):465-470.
- LAI Shaocong, ZHANG Guowei, PEI Xianzhi, et al. Geochemistry of the Pipasi ophiolite in the Mianlue suture South Qinling, and its tectonic significance zone[J]. Regional Geology of China,2002,21(8-9):465-470.
- 刘东生. 青海东部海相三叠纪地层新知[J]. 地质知识,1955,(05):23-24.
- LIN Dongsheng. New knowledge of marine Triassic strata in eastern Qinghai[J]. Geological knowledge, 1955,(05): 23-24.
- 裴先治,丁仁平,李佐臣,等. 西秦岭北缘关子镇蛇绿岩的形成时代:来自辉长岩中 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的证据[J]. 地质学报,2007c,81(11):1550-1561.
- PEI Xianzhi, DING Sanping, LI Zuochen, et al. LA-ICP-MS Zircon U-Pb Dating of the Gabbro from the Guanzizhen Ophiolite in the Northern Margin of the Western Qinling and Its Geological Significance[J]. Acta Geologica Sinica,2007c,81(11):1550-1561.
- 裴先治,丁仁平,张国伟,等. 西秦岭北缘新元古代花岗岩质麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义[J]. 地质学报,2007b,18(06):772-786.
- PEI Xianzhi, DING Sanping, ZHANG Guowei, et al. Zircons LA-ICP-MS U-Pb Dating of Neoproterozoic Granitoid Gneisses in the North Margin of West Qinling and Geological Implication[J]. Acta Geologica Sinica,2007b,18(06):772-786.
- 裴先治,丁仁平,张国伟,等. 西秦岭天水地区百花基性岩杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国科学(D 辑),2007,37(增刊 I):224-234.
- PEI Xianzhi, DING Sanping, ZHANG Guowei, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb age and geochemical characteristics of Baihua basic magmatic complex in Tianshui area, western Qinling [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2007,37(Suppl. I):224-234.

- 裴先治,李佐臣,李瑞保,等. 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[J]. 地学前缘,2012,19(5):205-224.
- PEI Xianzhi, LI Zuochen, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS U-Pb ages of detrital zircons from the meta-detrital rocks of the Early Palaeozoic Huluhe Group in eastern part of Qilian orogenic belt: Constraints of material source and sedimentary age[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(5):205-224.
- 裴先治,孟勇,丁仁平,等. 祁连-秦岭造山带交接部位 25 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义[J]. 地球科学与环境学报,2007d,29(02):111-116.
- PEI Xianzhi, MENG Yong, DING Sanping, et al. Identification of 2.5 Ga Detrital Zircons from Conjoint Area Between Qilian-Qinling Orogenic Belts and Its Geological Implication[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2007d, 29(02):111-116.
- 裴先治,孙仁奇,丁仁平,等. 陇东地区阎家店闪长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义[J]. 中国地质,2007a,34(1):8-16.
- PEI Xianzhi, SUN Renqi, DING Sanping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Yanjiadian diorite in the eastern Qilian Mountains and its geological significance[J]. Geology in China, 2007a, 34(1):8-16.
- 王洪亮,陈亮,孙勇,等. 北秦岭西段奥陶纪火山岩中发现近 4.1Ga 的捕虏锆石[J]. 科学通报,2007,52(14):1685-1694.
- WANG Hongliang, CHEN Liang, SUN Yong, et al. Nearly 4.1Ga of zirconium-trapped zircons found in the Ordovician volcanic rocks in the western part of the North Qinling[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(14):1685-1694.
- 王洪亮,何世平,陈隽璐,等. 甘肃马衔山花岗岩杂岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其构造意义[J]. 地质学报,2007,81(1):73-77.
- WANG Hongliang, HE Shiping, CHEN Junlu, et al. LA-ICP-MS Dating of Zircon U-Pb and Its Tectonic Significance of Maxianshan Granitoid Intrusive Complex, Gansu Province[J]. Acta Geological Sinica, 2007, 81(1):73-77.
- 王婧,张宏飞,徐旺春,等. 西秦岭党川地区花岗岩的成因及其构造意义[J]. 地球科学,2008,33(4):474-486.
- WANG Qian, ZHANG Hongfei, XU Wangchun, et al. Petrogenesis of Granites from Dangchuan Area in West Qinling Orogenic Belt and Its Tectonic Implication[J]. Earth Science, 2008, 33(4):474-486.
- 魏方辉,裴先治,李瑞保,等. 甘肃天水地区早古生代黄门川花岗闪长岩体 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年及构造意义[J]. 地质通报,2012,31(9):1496-1509.
- WEI Fanghui, PEI Xianzhi, LI Ruibao, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Early Paleozoic Huangmenchuan granodiorite in Tianshui area of Gansu Province and its tectonic significance[J]. Geological Bulletin of China, 2012, 31(9):1496-1509.
- 吴元保,郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约[J]. 科学通报,2004,49(16):1589-1064.
- WU Yuanbao, ZHANG Yongfei. Causes of zircon mineralogy study and interpretation of the U-Pb age constraints[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(16):1589-1065.
- 徐通,裴先治,刘成军,等. 南秦岭勉略构造带张儿沟新元古代变安山岩地球化学特征及锆石 LA-ICP-MSU-Pb 年龄-Rodinia 超大陆聚合事件的记录[J]. 地质论评,2016,62(02):434-450.
- XU Tong, PEI Xianzhi, LIN Chengjun, et al. Geochemical Features and Zircon LA-ICP-MS U-Pb Ages of the Neoproterozoic Zhangergou Metamorphic Andesitic Rocks in the Mianxian-Lueyang Area of South Qinling Orogen: Evidence for Amalgamation of Rodinia Supercontinent[J]. Geological Review, 2016, 62(02):434-450.
- 徐学义,陈隽璐,高婷,等. 西秦岭北缘花岗质岩浆作用及构造演化[J]. 岩石学报,2014,30(2):372-389.
- XU Xueyi, CHEN Junlu, GAO Ting, et al. Granitoid magmatism and tectonic evolution in northern edge of the Western Qinling terrane[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(2):372-389.
- 徐亚军. 北祁连造山带晚加里东-早海西期造山过程的沉积响应[D]. 武汉:中国地质大学(武汉),2009.
- XU Yajun. Sedimentary Response to the Late Caledonian-Early Hereynian Orogenesis, the North Qilian Orogen[D]. Wuhan: China University of Geosciences (Wuhan), 2009.
- 肖林,霍勤知,刘彬,等. (合作镇)(岷县)幅 1:25 万区域地质调查(修测)报告[R]. 兰州:甘肃省地质调查院,2007.
- 闫全人,王宗起,闫臻,等. 秦岭勉略构造混杂带康县-勉县段蛇绿岩块-铁镁质岩块的 SHRIMP 年代及其意义[J]. 地质论评,2007,53(06):755-764.
- YAN Quanren, WANG Zongqi, YAN Zhen, et al. SHRIMP Analyses for Ophiolitic-Mafic Blocks in the Kangxian-Mianxian Section of the Mianxian-Lueyang Melange:

- Their Geological Implications [J]. Geological Review, 2007, 53(06): 755-764.
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 西秦岭楔的构造属性及其增生造山过程[J]. 岩石学报, 2012, 28(06): 1808-1828.
- YAN Zhen, WANG Zongqi, LI Jiliang, et al. Tectonic settings and accretionary orogenesis of the West Qinling Terrane, northeastern margin of the Tibet Plateau. [J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(06): 1808-1828.
- 闫臻, 王宗起, 王涛, 等. 西秦岭大草滩群的沉积环境及构造意义[J]. 地质通报, 2002, 21(8-9): 505-515.
- YAN Zhen, WANG Zongqi, WANG Tao, et al. Sedimentary environment and tectonic significance of the Dacotan Group of the Western Qinling Mountains [J]. Regional Geology of China, 2002, 21(8-9): 505-515.
- 杨钊, 董云鹏, 柳小明, 等. 西秦岭天水地区关子镇蛇绿岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年[J]. 地质通报, 2006, 25(11): 1321-1325.
- YANG Zhao, DONG Yunpeng, LIU Xiaoming, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of gabbro in the Guanzhen ophiolite, Tianshui, West Qinling, China [J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(11): 1321-1325.
- 殷鸿福. 秦岭及邻区三叠系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- YIN Hongfu. Triassic in Qinling and adjacent areas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992.
- 张成立, 王涛, 王晓霞, 等. 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.
- ZHANG Chengli, WANG Tao, WANG Xiaoxia, et al. Origin and Tectonic Setting of the Early Mesozoic Granitoids in Qinling Orogenic Belt[J]. Geological Journal of China Universities, 2008, 14(3): 304-316.
- 张国伟, 程顺有, 郭安林, 等. 秦岭—大别中央造山系南缘勉略古缝合带的再认识—兼论中国大陆主体拼合[J]. 地质通报, 2004, 23(9-10): 846-853.
- ZHANG Guowei, CHEN Shunyou, GUO Anlin, et al. Mianlue paleo-suture on the southern margin of the Central Orogenic System in Qinling-Dabie with a discussion of the assembly of the main part of the continent of China [J]. Regional Geology of China, 2004, 23(9-10): 846-853.
- 张国伟, 董云鹏, 赖绍聪, 等. 秦岭—大别造山带南缘勉略构造带与勉略缝合带[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1121-1135.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, LAI Shaocong, et al. The southern margin of the Qinling-Dabie orogenic belt and the slightly suture zone [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 2003, 33(12): 1121-1135.
- 张国伟, 董云鹏, 李三忠, 等. 秦岭勉略构造带与中国大陆构造[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- ZHANG Guowei, DONG Yunpeng, LI Sanzhong, et al. Qinling Weilu structural belt and Chinese mainland structure [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- 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 Benren, YUAN Xuecheng, et al. Qinling orogenic belt and continental dynamics [M]. Beijing: Science Press, 2001.
- 张宏飞, 陈岳龙, 徐旺春, 等. 青海共和盆地周缘印支期花岗岩类的成因及其构造意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(12): 2910-2922.
- ZHANG Hongfei, CHEN Yuefei, XU Wangchun, et al. Granitoids around Gonghe basin in Qinghai province: petrogenesis and tectonic implications [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(12): 2910-2922.
- 张志国, 陈隽璐, 徐学义, 等. 木其滩岩组形成时代、地球化学特征—对北秦岭构造演化制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 757-769.
- ZHANG Zhiguo, CHEN Junlu, XU Xueyi, et al. Geochronology and geochemistry of the Neo-Proterozoic amphibolites in the Muqitan Formation: Implications for the tectonic evolution of the North Qinling Orogen [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(3): 757-769.
- BOYNTON W V. Cosmochemistry of the rare earth elements [J]. Meteorite Studies Dev., Geochemistry, 1984, 2: 63-114.
- SUN S S, MCDONOUGH W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes [J]. In: Saunders A D and Norry M J. Magmatism in the Ocean Basins. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.
- BHATIA M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones [J]. J. Geol., 1983, 91(06): 611-627.
- BHATIA M R, CROOK K A W. Trace element characteristics of graywackes and tectonic setting discrimination of sedimentary basins [J]. Contrib. Mineral. Petrol., 1986, 92: 181-193.
- ROSER B P, KORSCH R J. Determination of tectonic setting of sandstone—mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O Ratio [J]. J. Geol., 1986, 94(5): 635-650.
- CAWOOD P A and NEMCHIN A A. Provenance record of a

- rift basin; U / Pb ages of detrital zircons from the Perth Basin, Western Australia [J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 134(3-4): 209-234
- CAWOOD P A, NEMCHIN A A. Paleogeographic development of the east Laurentian margin: Constraints from U-Pb dating of detrital zircons in the Newfoundland Appalachians [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2001, 113: 124-1246.
- CHEN F K, HEGNER E, TODT W. Zircon ages, Nd isotopic and chemical compositions of orthogneisses from the Black Forest, Germany: Evidence for a Cambrian magmatic arc [J]. *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 2000, 88: 791-802.
- GENG Yuansheng, LIU Fulai, YANG Chonghui. Magmatic event at the end of the Archean in the eastern Hebei province and its geological implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2006, 80: 819-833.
- GRANT M L, WILDE S A, WU F Y, et al. The application of zircon cathodoluminescence imaging Th-U - Pb chemistry and U - Pb ages in interpering discrete magmatic and high-grade metamorphic events in the north china corton at the archean/proterozoic boundary [J]. *Chemical Geology*, 2009, 261: 155-171.
- GRIMMER J C, RATSCHBACHER L, MC WILLIAMS M, et al. When did the ultrahigh-pressure rocks reach the surface? $A^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ zircon, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ white mica, Si-in-white mica, single-grain provenance study of Dabie Shan synorogenic foreland sediments [J]. *Chemical Geology*, 2003, 197(1-4): 87-110.
- HOSKIN PWO. The composition of zircon and igneous and metamorphic petrogenesis [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2003, 53(1): 27-62.
- MALUSA M G, FACCENNA C, Garzanti E, et al. Divergence in subduction zones and exhumation of high pressure rocks (Eocene Western Alps) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 310 (1-2): 21-32.
- MENG Qingren, WANG Erchie, Hu Jianmin. Mesozoic sedimentary evolution of the northwest Si chuan Basin: Implication for continued clockwise rotation of the South China Block [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2005, 117(3/4): 396-410.
- WEISLOGEL A L, GRAHAM S A, CHANG E Z, et al. Detrital zircon provenance of the Late Triassic Songpan-Ganzi complex: sedimentary record of collision of the North and South China blocks [J]. *Geology*, 2006, 34: 97-100
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Tectonic evolution of a composite collision orogen: an overview on the Qinling-Tongbai-Hong'an-Dabie-Sulu orogenic belt in central China [J]. *Gondwana Research*, 2013, 23: 1402-1428.
- YU Haocheng, QIU Kunfeng, MIGUEL T N, et al. Early orogenic gold mineralization event in the West Qinling related to closure of the Paleo-Tethys Ocean-Constraints from the Ludousou gold deposit, central China [J]. *Ore Geology Reviews*, 2020, 117: 1-15.
- ZHANG Hongfei, ZHANG Benren, HARRIS N, et al. U - Pb zircon SHRIMP ages, geochemical and Sr-Nd-Pb isotopic compositions of intrusive rocks from the Longshan-Tianshui area in the southeast corner of the Qilian orogenic belt, China: Constraints on petrogenesis and tectonic affinity [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27: 751-764.