

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.2-3.011

青藏高原东北缘烟筒山构造带二叠系红泉组沉积时代及物源示踪

寇琳琳^{1,2}, 李海龙^{2*}, 李振宏¹, 董晓朋¹, 崔加伟¹, 黄婷¹KOU Linlin^{1,2}, LI Hailong^{2*}, LI Zhenhong¹, DONG Xiaopeng¹, CUI Jiawei¹, HUANG Ting¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081;

2. 中国地质科学院, 北京 100037

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China;

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:青藏高原东北缘烟筒山构造带局部零星出露二叠系红泉组, 由于尚未发现古生物化石, 该套地层仍缺乏精确的年代学约束。同时, 该地区地处北祁连地块、阿拉善地块与鄂尔多斯地块的过渡带, 二叠纪沉积物源究竟来自于北东方向的鄂尔多斯地块, 还是北部的阿拉善地块, 或是西南部的北祁连地块, 由于露头的局限性, 也一直缺乏系统的沉积学方面证据的支持。以二叠系红泉组底部的凝灰质长石砂岩为研究对象, 在碎屑岩锆石 U-Pb 同位素测年基础上, 对该套地层的沉积时代及物源进行了重新厘定。研究认为, 二叠系红泉组底部凝灰质长石砂岩碎屑锆石年龄序列主要包括 264 Ma、1811 Ma、1928 Ma、2348 Ma、2465 Ma 五个峰值, 其中 264 Ma 年龄峰值的锆石为同期火山喷发凝灰质火山灰的产物, 代表了该套地层沉积的起始时代, 因此红泉组的沉积时代应该归属于中二叠世末—晚二叠世; 其碎屑锆石的年龄峰值序列与华北克拉通西部北缘基底隆起带特征较一致, 而与阿拉善地块及北祁连地块的年龄峰值序列相差较远, 其沉积物源应该与鄂尔多斯地块二叠纪一致, 主要来自于北东方向的华北克拉通西部北缘基底隆起带。该研究成果首次厘定了青藏高原东北缘弧形构造带二叠系红泉组的沉积时代, 其物源方向的确定为区域岩相古地理的恢复提供了基础地质依据。

关键词:二叠系; 红泉组; 锆石 U-Pb 同位素测年; 物源示踪; 烟筒山构造带; 地质调查工程

中图分类号: P534.46; P597⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2022)02/03-0315-12

Kou L L, Li H L, Li Z H, Dong X M, Cui J W, Huang T. Sedimentary age and provenance tracing of the Permian Hongquan Formation in the Yantongshan structural belt on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(2/3): 315-326

Abstract: Restricted by the absence of reliable fossils, the sedimentary age of the Permian Hongquan Formation which was sporadically exposed in the Yantongshan Fault Belt at the northeastern margin of the Tibetan Plateau has always been under dispute. Besides, due to the lack of reliable sedimentary structures in the Permian Hongquan Formation and outcrops, whether the sediments were sourced from the Ordos Block in the northeast, Alxa Block in the north or Northern Qilian Block in the west is undefined. The sedimentary age and provenance of tuffaceous feldspar sandstone at the bottom of the Permian Hongquan Formation were redefined based on zircon U-Pb dating. The results show that the age spectra of the detrital zircons from the tuffaceous feldspathic sandstone yields five age peaks at 264 Ma, 1811 Ma, 1928 Ma, 2348 Ma, and 2465 Ma, among which the zircons with the age of 264 Ma mostly come from tephra deposited during the early stage of the Hongquan Period. Therefore, the sedimentary age of the Hongquan Formation is 264 Ma which can be

收稿日期: 2020-10-15; 修订日期: 2021-03-20

资助项目: 中国地质调查局项目《特殊地质地貌区填图试点》(编号: DD20160060) 和国家自然科学基金项目《川滇地块东部断裂带的右行走滑变形研究: 对青藏高原物质向东挤出的制约》(批准号: 41872223)

作者简介: 寇琳琳(1998-), 女, 在读硕士生, 从事沉积地质和石油地质研究。E-mail: 1976734800@qq.com

* 通信作者: 李海龙(1982-), 男, 副研究员, 从事区域构造地质解析研究。E-mail: S050123@126.com

attributed to the late stage of the Middle Permian to Late Permian. The age spectra of the detrital zircons from the Hongquan Formation have similarity with the age spectra of the basement of the western part of the North China Craton, and significant difference with the age spectra of the basement of the Alxa Block and North Qilian Block. Consequently, it is inferred that the sedimentary materials of the Permian Hongquan Formation should come from the Ordos Block in the northeast. This research not only redefines the sedimentary age of the Hongquan Formation in the arcuate tectonic belt at the northeastern margin of the Tibetan Plateau, but also provides solid evidence for the sedimentary source tracing for the reconstruction of the Permian regional lithofacies palaeogeography.

Key words: Permian; Hongquan Formation; detrital zircon U-Pb dating; sedimentary source tracing; Yantongshan structure belt; geological survey engineering

青藏高原东北缘弧形构造带作为青藏高原向东北方向推挤的前锋带,其出露的沉积地层以古近系和新近系为主,仅在海原断裂带、香山-天景山断裂带、烟筒山断裂带及大罗山-牛首山构造带的核心部位由于断裂的强烈挤压走滑作用,局部出露前新生代地层,地层整体变形较强烈,沉积构造改造较强,给区域沉积物源分析及岩相古地理格局恢复带来了较大困难^[1-4]。在烟筒山构造带中部,由于新生代以来的多期强烈活动,局部出露二叠系,下部为海陆交互相含煤碎屑岩建造,中上部则为碎屑岩-火山碎屑岩建造,其岩石地层序列自下而上为大黄沟组和红泉组。二叠系红泉组为一套干旱气候条件下的河流相红色碎屑岩-火山碎屑岩建造,岩层以紫红色调与下伏大黄沟组相区别。在宁夏境内,二叠系红泉组至今没有获得任何化石依据,其地层时代的划分主要通过甘肃地区红泉组的区域对比而确定,在甘肃省金昌市大泉一带,该套地层含植物化石 *Pecopteris lativenosa*, *P. tenuicostata*, *Annularis* sp. 等,该植物化石组合面貌具有华夏植物群与安加拉植物群混生的特点,其时代为晚二叠世早期^[5]。目前,该套地层尚缺乏精确的年代学约束。研究区二叠系红泉组的岩性特征主要由下部凝灰质火山碎屑岩、上部碎屑岩和粘土岩类构成,这也为利用碎屑岩锆石 U-Pb 同位素测年限定该套地层的沉积时代提供了岩石基础。本文以烟筒山构造带二叠系红泉组下部的凝灰质火山碎屑岩作为研究对象,采用碎屑岩锆石 U-Pb 同位素测年获得年龄序列,根据最新的年龄峰值确定地层的沉积时代下限,同时依据锆石的年龄序列与相邻的华北克拉通西部北缘隆起带、阿拉善地块、北祁连地块的锆石年龄序列开展系统对比,进而确定该套地层的沉积物源,该研究成果可为青藏高原东北缘

弧形构造带二叠纪岩相古地理格局恢复提供基础地质依据。

1 区域地质概况

青藏高原东北缘弧形构造带在大地构造位置上隶属于华北克拉通、阿拉善地块及祁连地块三者的交汇部位,其地质历史的演化过程与三者密切相关(图1)^[6-8]。该区地质演化历史先后经历了中—新元古代大陆裂谷体制演化阶段、寒武纪—志留纪陆缘裂陷体系发育阶段、泥盆纪—三叠纪板内伸展与变形构造阶段、侏罗纪—上新世末期板内拗陷与

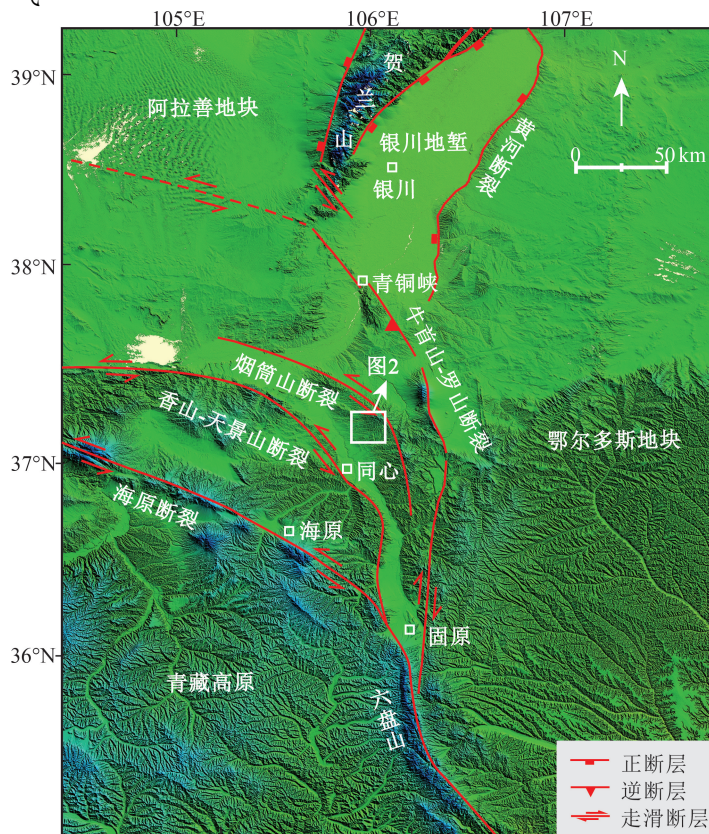


图1 研究区区域构造位置

Fig. 1 Tectonic location of the study area

强烈构造变形阶段及第四纪以来盆-岭构造演化阶段^[9-10]。在 10~8 Ma, 青藏高原隆升向东北方向的推挤作用影响到鄂尔多斯地块西缘地区, 约 2.5 Ma, 青藏高原向东北方向的推挤作用达到高峰期, 青藏高原东北缘的构造地貌基本定型, 形成现今由典型的海原断裂、香山-天景山断裂、烟筒山断裂、大罗山-牛首山断裂 4 条弧形断裂体系构成的盆山构造格局^[11-13]。

青藏高原东北缘弧形构造带隶属祁连-北秦岭地层分区, 烟筒山构造带中部出露的地层主要包括奥陶系、志留系、泥盆系、石炭系、二叠系、侏罗系、白垩系及古近系-新近系, 其大部分地区被第四系马兰黄土覆盖(图 2)^[5]。该区二叠系岩石地层序列自下而上划分为中-下二叠统大黄沟组 and 上二叠统红泉组, 可以与华北西缘地层分区对比; 华北西缘地层

分区地层序列自下而上为山西组、石盒子组和孙家沟组(表 1)。其中大黄沟组主要为一套以灰黑色页岩、粉砂质页岩、泥岩, 局部夹含炭质页岩为主的曲流河沉积, 泥岩含钙质结核, 局部夹煤线, 其岩石色调以深灰色为主。该套地层的页岩中普遍产植物化石 *Calamites suckowii*, *C. sp.*, *Lobatannulariasinensis*, *Lyginodendron sp.*, *Cordiatesprincipalis*, *Pecopteriswongii*, *P. sp.*, 这些化石在华北地层分区的山西组和石盒子组下段广泛发育, 地层时代应归属于早-中二叠世^[5]。红泉组为一套辫状河河流相沉积, 地层序列整体以紫红色调为主, 下部为火山碎屑岩, 上部为碎屑岩和粘土岩类沉积, 其岩性、岩相特征不仅在区内具有一致性, 而且与邻区甘肃肃南县大青沟、景泰县五佛寺等地的红泉组相似, 均可对比。区域上, 红泉组以紫红色调与下伏大黄沟组深灰色色调相区别, 二者之间为整合接触。

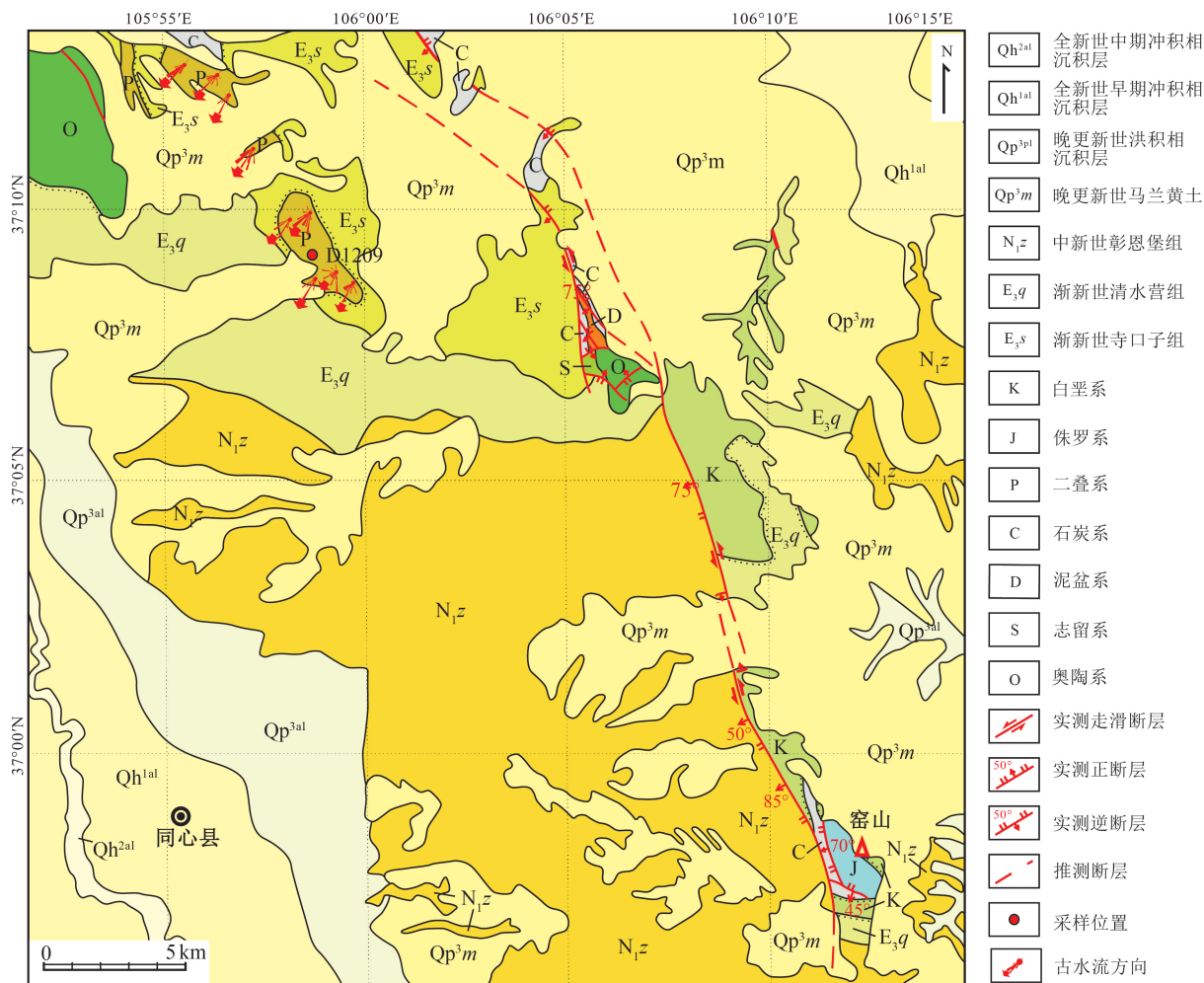


图 2 烟筒山构造带及邻区区域地质简图

Fig. 2 Regional geological map of Yantongshan structural belt and its adjacent area

表 1 祁连—华北地区二叠纪地层划分对比^[5]
Table 1 Correlation of Permian stratigraphic division between Qilian and North China

地层系统			祁连—北秦	华北地
界	系	统	岭地层分区	层分区
上古生界	二叠系	上统	红泉组(P ₃ h)	孙家沟组(P ₃ s)
		中统	大黄沟组	石盒子组(P ₂ sh)
		下统	(P ₁₋₂ d)	山西组(P ₁ sh)

2 样品采集与测试方法

样品采自烟筒山地区上二叠统红泉组底部紫红色凝灰质砂岩(编号: D1209, 坐标: 东经 105°58′44.56″、北纬 37°8′50.81″),凝灰质结构,斑杂构造,较致密,成分以长石为主,石英次之。岩石镜下定名为含凝灰质不等粒岩屑长石砂岩(图 3),碎屑间呈点—线状接触,碎屑定向分布,破裂现象普遍,沿碎屑边缘具有极薄的铁质膜,部分碎屑内部含少量磁铁矿、个别隐晶岩砾石及正长石碎屑;填隙物为轻微蚀变的火山灰,凝灰质蚀变形成少量绿泥石及伊利石粘土矿物。陆源碎屑物质约

占 82%,主要包括石英(25.7%)、长石(30%)、火成岩岩屑(5.5%)、变质岩岩屑(18.8%)及云母(2%);填隙物约占 18%,主要包括凝灰质(13%)、水云母(3.5%)、硅质(1%)及少量铁质及长石质。

样品粉碎及锆石挑选、制靶及阴极发光、透射光、反射光照相工作均由河北省区域地质调查研究院测试分析实验室完成。首先将样品破碎到 40~60 目,并采用电磁分选和浮选 2 种方法进行锆石分选;然后在双目镜下选取表面干净、自形程度较高、无包裹体且裂隙不发育的锆石颗粒作为制靶对象。LA-ICP-MS 锆石微区 U-Th-Pb 同位素测定在北京燕都中实测试技术有限公司完成,激光剥蚀系统为 New Wave UP213,ICP-MS 为布鲁克 M90。激光剥蚀过程中采用氦气作载气、氩气为补偿气以调节灵敏度,二者在进入 ICP 之前通过一个 Y 型接头混合,每个时间分辨分析数据包括 20~30 s 的空白信号和 50 s 的样品信号。锆石 U-Pb 同位素定年采用锆石标准 GJ-1 作外标进行 U、Th、Pb 同位素分馏校正,每分析 5~10 个样品点,分析 2 次 GJ-1,本次测试剥蚀光斑直径根据实际情况选择 30 μm。

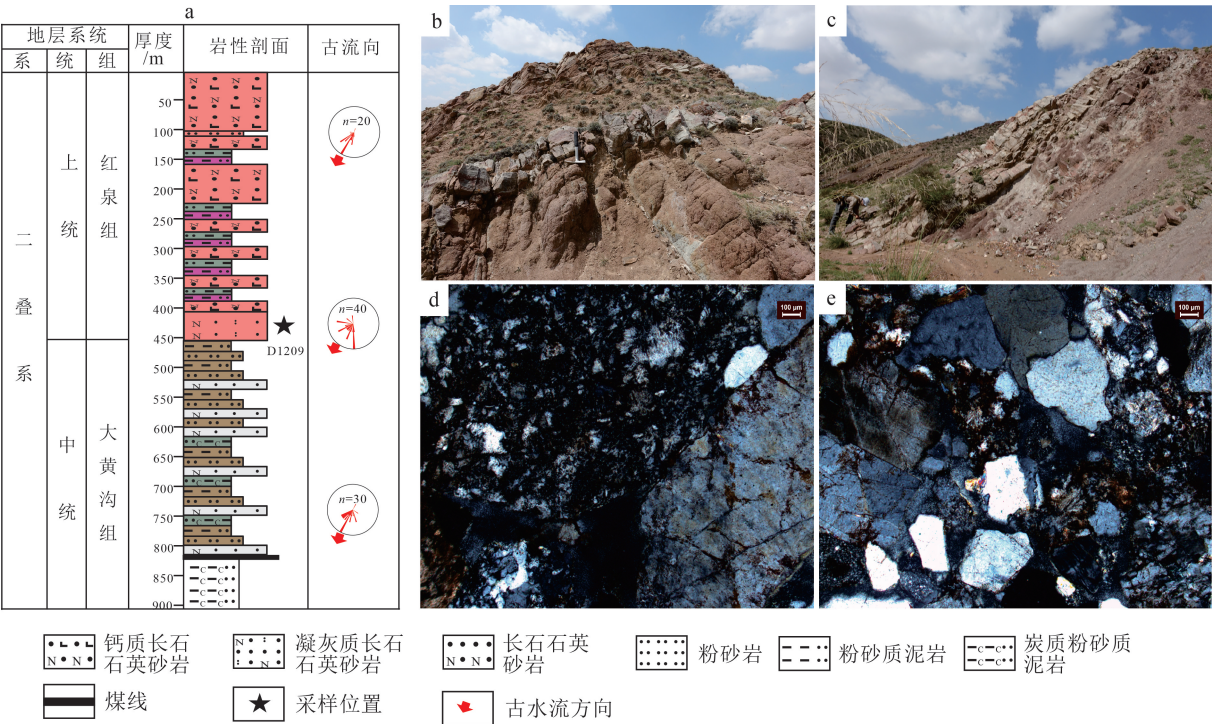


图 3 烟筒山构造带二叠系红泉组沉积特征

Fig. 3 Sedimentary characteristics of the Permian Hongquan Formation in Yantongshan structural belt
a—二叠系岩性综合柱状图;b、c—二叠系红泉组野外典型照片;d、e—二叠系红泉组含凝灰质不等粒长石岩屑砂岩镜下特征

数据处理采用中国地质大学刘勇胜博士研发的 ICP-MS DataCal 程序和 Ludwig 开发的 Isoplot 程序^[14-16], 采用 NIST610 玻璃作标样计算锆石中的 U、Th、Pb 含量。对于年龄值小于 1000 Ma 的锆石颗粒, 因为一般不存在铅丢失而采用²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄作为测试点的锆石年龄; 对于年龄值大于 1000 Ma 的锆石颗粒, 因锆石中含较多的放射性铅而引起铅丢失, 故采用²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb 表面年龄作为测试点的锆石年龄^[17]。为了保证碎屑锆石测试结果的随机性和可靠性, 并且能够全面反映沉积物源可能存在的源区特征, 激光剥蚀点选择的位置一般都集中在具有振荡环带的部位, 测点基本上覆盖了阴极发光照片中不同外形、粒度及环带的锆石。

3 测试结果

本次测试选取谐和率大于 90% 的样品点作为有效样品点进行分析, 共获得有效锆石样品点 112 个(表 2)。锆石阴极发光图像显示, 样品中大部分锆石形态呈浑圆状、椭圆状(约占 60%), 少部分呈长轴状(约占 20%), 还有部分锆石较破碎, 棱角较分明(约占 20%)(图 4)。大部分锆石的颜色较深, 呈深灰色、灰黑色, 且时代较老, 为太古宙—元古宙

锆石, 少部分锆石的颜色较浅, 呈淡白色或浅灰色, 这部分锆石的时代一般都较新, 为古生代锆石。锆石颗粒大小一般为 70~150 μm , 约占锆石总量的 80% 以上, 仅有少部分锆石的颗粒大于 150 μm , 或者小于 70 μm , 分别占锆石总量的 10% 左右。大部分锆石的核边结构较明显, 可见明显的振荡环带, 而且锆石颗粒核部多呈灰黑色, 颜色较深, 边部多呈浅灰色或灰白色, 颜色较浅, 仅有少量锆石可以见到变质边, 但变质边一般较窄, 不能进行有效的同位素年龄测试, 因而也不能精确获得锆石变质边的年龄。锆石 U、Th 含量分别介于 $20.43 \times 10^{-6} \sim 1240.56 \times 10^{-6}$ 和 $5.13 \times 10^{-6} \sim 2766.31 \times 10^{-6}$ 之间, Th/U 值一般介于 0.025~37.64 之间, 其中仅有 60% 以上的 Th/U 值大于 0.4, 因而锆石的成因较复杂, 多为沉积再搬运的锆石。锆石的整体年龄序列存在 5 个较明显的峰值, 分别为 264 Ma、1811 Ma、1928 Ma、2348 Ma 和 2465 Ma, 除 264 Ma 年龄峰值为古生代锆石外, 其余均为太古宙—元古宙古老基底形成的锆石(图 5)。次要年龄段还分别包括 311.9~316.99 Ma(5 个数据)、377.59 Ma(1 个数据)、1584.88~1661.11 Ma(2 个数据)、1716.67~1787.04 Ma(5 个数据)。其中, 最古老的锆石年龄为 2524.07 Ma, 最年轻锆石的年龄为 262.12 Ma。



图 4 二叠系红泉组代表性碎屑锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 4 Representative CL images of zircons from the Permian Hongquan Formation

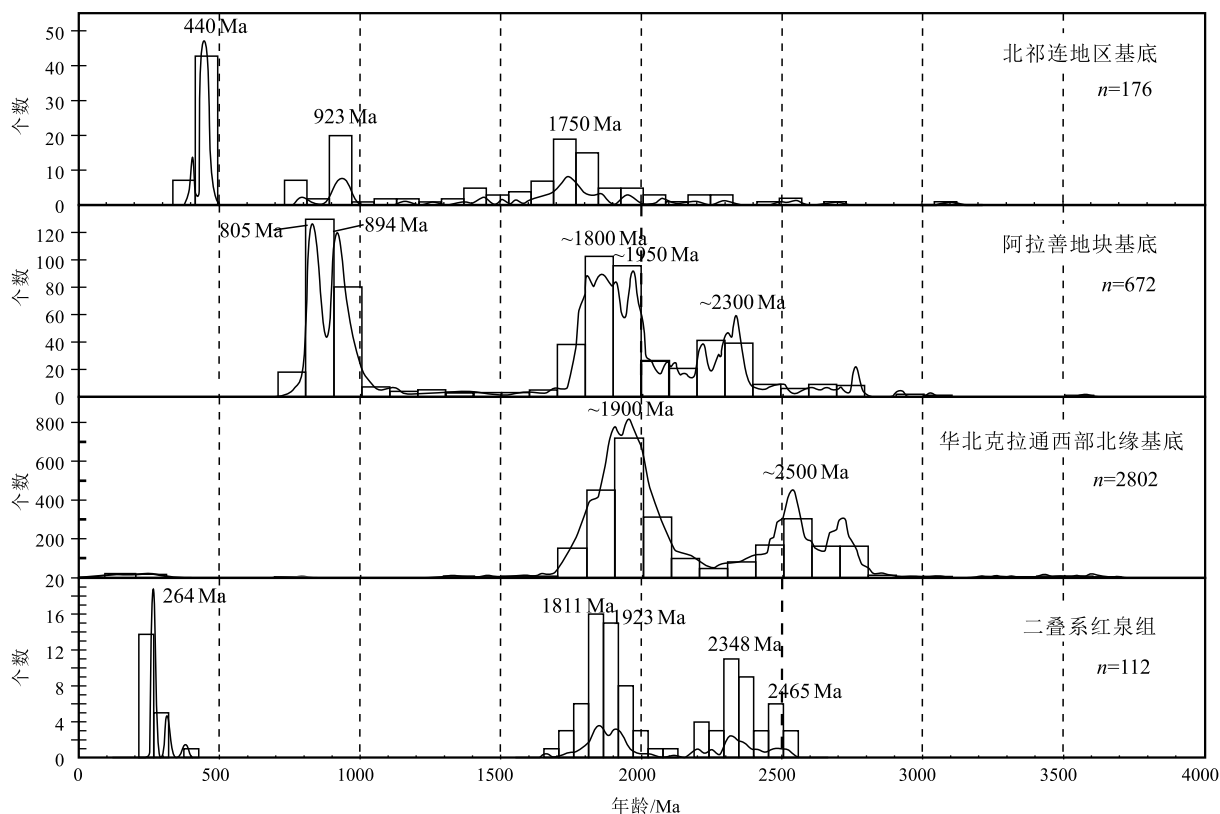


图5 二叠系红泉组、华北克拉通西部北缘基底、阿拉善地块基底与北祁连地区基底碎屑锆石年龄谱图

Fig. 5 Detrital zircon U-Pb ages of the Permian Hongquan Formation, North China
Craton basement, Alxa basement and North Qilian basement

4 讨论

4.1 地层时代

在青藏高原东北缘弧形构造带局部出露的二叠系红泉组底部,普遍发育一套含凝灰质的不等岩屑长石砂岩,凝灰质应为同期火山喷发的产物。碎屑锆石 U-Th-Pb 同位素测年结果表明,碎屑锆石年龄序列中最年轻的峰值为 264 Ma,年龄值较集中,该峰值范围内的 14 个锆石年龄值主要介于 262.12~266.77 Ma 之间(图 6)。锆石阴极发光图像显示,该峰值段的锆石形态较破碎,棱角较分明,具有凝灰岩锆石的特点,该年龄峰值应代表二叠系红泉组底部的沉积时代。在国际地层年代表中,二叠系自下而上被划分为乌拉尔统、瓜德鲁普统和乐平统,根据 264 Ma 年龄峰值,红泉组底部相当于国际地层表中的瓜德鲁普统卡匹敦阶,在时间序列上相当于中晚二叠世过渡时期^[18]。在烟筒山构造带一线,红泉组的沉积厚度可达 450 m,因此红泉组的整

体沉积时代应该为晚二叠世。

4.2 物源示踪

沉积构造测量是进行古水流恢复的重要手段,在烟筒山构造带零星出露的二叠系大黄沟组及红泉组中,局部仍能观察到较清晰的斜层理,通过对其产状进行系统的测量,恢复沉积时期的古水流方向,大黄沟组与红泉组的古水流方向基本上表现出完全一致的特征,指示物源主要来自研究区北东方向的鄂尔多斯地块。锆石作为碎屑岩重矿物组成中最稳定的矿物之一,具有抗风化能力强、受后期热构造事件作用影响小的特点,其微区原位年龄分布特征可以用来判断沉积中碎屑物质的来源^[19-21]。近年,利用碎屑锆石年龄序列特征进行物源示踪,进而恢复区域古地理背景已经成为一种较成熟的方法^[22-26]。烟筒山构造带在大地构造位置上位于西部北祁连地块、东部华北西部鄂尔多斯地块及北部阿拉善地块之间,开展二叠纪沉积时期的物源示踪,对于区域岩相古地理的恢复具有重要的意义。

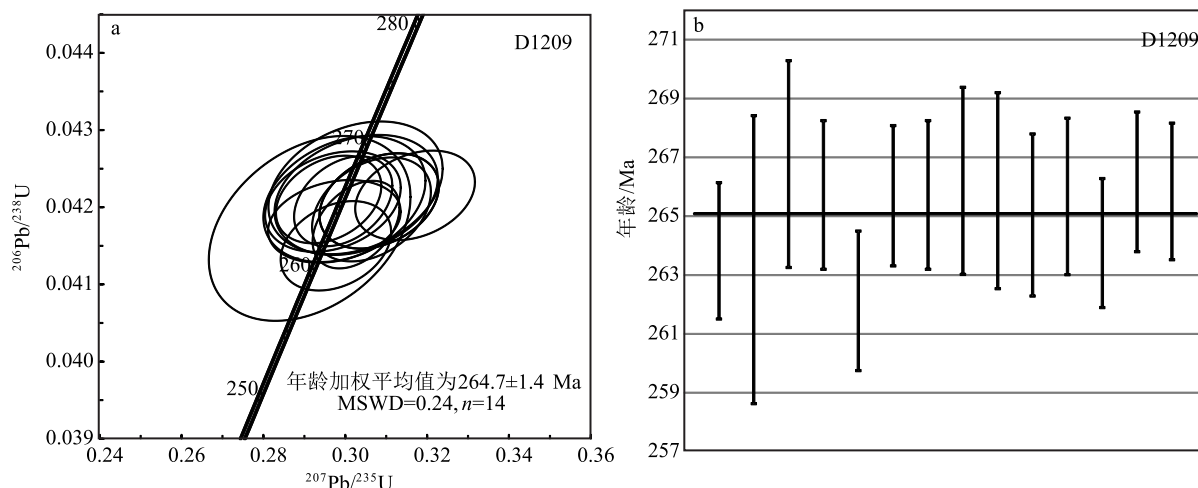


图 6 二叠系红泉组 264 Ma 峰值锆石 U-Pb 年龄谐和图

Fig. 6 Concordia plots of zircon U-Pb ages at 264 Ma age peak for the Permian Hongquan Formation

对华北克拉通西部北缘基底、阿拉善地块基底及北祁连地区的基底锆石年龄统计结果表明,三者基底锆石年龄序列具有完全不同的特征。华北克拉通西部北缘基底的锆石年龄具有 1900 Ma 和 2500 Ma 两个明显的峰值^[27-28],阿拉善地块基底具有 805 Ma、894 Ma、1800 Ma、1950 Ma 及 2300 Ma 五个峰值^[29-30],北祁连地区基底具有 440 Ma、923 Ma 及 1750 Ma 三个主要峰值^[31-33]。3 个块体基底年龄峰值特征的不同,对于烟筒山地区二叠系红泉组沉积物源的示踪提供了明确的方向。

红泉组碎屑锆石的年龄峰值除同期凝灰质物质的参与外,其年龄峰值主要包括 811 Ma、1928 Ma、2348 Ma 和 2465 Ma 四个峰值,与华北克拉通西部北缘基底的锆石年龄峰值基本一致,而与阿拉善地块基底、北祁连地区基底的峰值年龄特征完全不同,说明青藏高原东北缘弧形构造带在二叠纪沉积时期主要接受来自其北东方向华北克拉通西部北缘基底提供的物源,与整个鄂尔多斯盆地北部乃至华北克拉通二叠纪沉积时期的主要物源方向基本一致(图 7)^[34]。

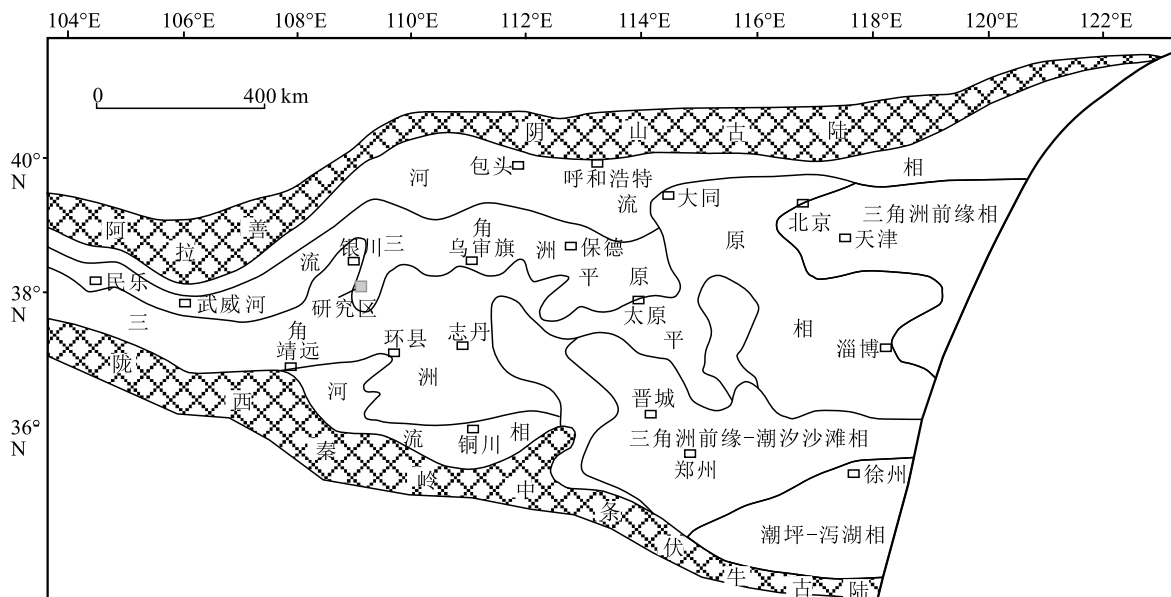


图7 华北克拉通-河西走廊二叠纪岩相古地理图(据参考文献[34]修改)

Fig. 7 Permian lithofacies–paleogeography of North China Craton–Hexi Corridor area

表 2 二叠系红泉组 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic results of Permian Hongquan Formation

测点编号	Pb 总量 / 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度				
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
				1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$					
D1209-ZR-01	244.9232	134.6405	479.2076	0.1395	0.0013	7.9196	0.0775	0.4102	0.0025	2221.30	16.67	2221.92	8.82	2215.84	11.59	99%
D1209-ZR-02	10.1796	25.3706	162.7621	0.0979	0.0024	0.6907	0.0189	0.0504	0.0005	1584.88	45.06	533.21	11.36	316.99	3.09	98%
D1209-ZR-03	447.6593	210.2011	850.9660	0.1535	0.0014	8.9948	0.0870	0.4232	0.0027	2384.88	214.97	2337.48	8.84	2275.05	12.13	97%
D1209-ZR-04	49.2128	45.3410	124.7569	0.1121	0.0012	4.9115	0.0558	0.3170	0.0024	1833.03	19.91	1804.24	9.59	1774.95	11.55	98%
D1209-ZR-05	70.5605	24.4580	206.8141	0.1104	0.0010	4.4446	0.0450	0.2911	0.0020	1805.87	21.30	1720.69	8.40	1646.81	10.03	95%
D1209-ZR-06	65.3574	57.7730	146.8159	0.1201	0.0011	5.8548	0.0592	0.3526	0.0025	1957.10	16.36	1954.57	8.78	1946.82	11.74	99%
D1209-ZR-07	12.5215	157.1142	231.9714	0.0525	0.0012	0.3026	0.0070	0.0418	0.0004	305.62	56.48	268.45	5.46	263.82	2.32	98%
D1209-ZR-08	29.4572	31.6004	74.4639	0.1123	0.0012	4.8276	0.0538	0.3112	0.0024	1838.89	18.52	1789.71	9.38	1746.46	12.05	97%
D1209-ZR-09	271.4340	174.8665	657.0142	0.1173	0.0009	5.4646	0.0508	0.3369	0.0025	1916.67	13.74	1895.05	7.98	1871.81	11.89	98%
D1209-ZR-10	42.0105	94.7759	58.0751	0.1477	0.0015	8.7081	0.1032	0.4267	0.0037	2320.38	16.98	2307.93	10.80	2290.74	16.90	99%
D1209-ZR-11	45.2959	52.9515	125.3318	0.1069	0.0010	4.1836	0.0420	0.2830	0.0020	1747.83	16.51	1670.81	8.22	1606.42	9.83	96%
D1209-ZR-12	39.6044	446.6098	788.3788	0.0531	0.0018	0.3083	0.0096	0.0421	0.0004	331.54	75.92	272.85	7.47	265.72	2.52	97%
D1209-ZR-13	111.2808	24.6086	308.7363	0.1131	0.0009	4.8378	0.0462	0.3091	0.0021	1850.31	14.35	1791.49	8.03	1736.07	10.36	96%
D1209-ZR-14	199.4287	146.5378	397.2847	0.1376	0.0010	7.6728	0.0724	0.4033	0.0029	2198.15	12.96	2193.42	8.47	2184.06	13.41	99%
D1209-ZR-15	198.3574	368.6425	401.0845	0.1555	0.0012	8.0443	0.0743	0.3741	0.0027	2409.26	12.65	2236.01	8.34	2048.45	12.71	91%
D1209-ZR-16	101.5650	98.4300	170.0070	0.1631	0.0013	9.9444	0.0885	0.4411	0.0029	2487.96	12.50	2429.64	8.21	2355.71	12.95	96%
D1209-ZR-17	17.6519	33.5114	37.7676	0.1225	0.0016	5.7670	0.0896	0.3404	0.0032	1994.45	23.92	1941.48	13.45	1888.69	15.34	97%
D1209-ZR-18	77.1524	2766.3136	1066.5845	0.0516	0.0014	0.2995	0.0079	0.0421	0.0004	264.88	58.33	266.01	6.19	265.70	2.38	99%
D1209-ZR-19	60.5955	61.2617	104.5064	0.1536	0.0014	9.2617	0.0962	0.4362	0.0032	2387.04	213.89	2364.24	9.52	2333.64	14.44	98%
D1209-ZR-20	7.9543	5.1380	21.8262	0.1092	0.0018	4.5904	0.0738	0.3069	0.0032	1787.04	30.87	1747.53	13.40	1725.66	15.77	98%
D1209-ZR-21	67.3455	156.4165	140.9530	0.1143	0.0010	5.2069	0.0552	0.3295	0.0025	1869.45	16.67	1853.74	9.03	1836.12	12.32	99%
D1209-ZR-22	128.2563	107.6447	317.8762	0.1177	0.0011	5.3196	0.0638	0.3266	0.0030	1924.08	16.67	1872.02	10.26	1822.12	14.35	97%
D1209-ZR-23	65.4777	161.0954	83.3875	0.1601	0.0016	10.1839	0.1119	0.4604	0.0036	2457.09	16.67	2451.62	10.16	2441.50	15.75	99%
D1209-ZR-24	39.6044	446.6098	788.3788	0.0531	0.0018	0.3083	0.0096	0.0421	0.0004	331.54	75.92	272.85	7.47	265.72	2.52	97%
D1209-ZR-25	25.0561	540.7179	436.7464	0.0521	0.0023	0.3027	0.0132	0.0422	0.0005	300.06	99.99	268.48	10.26	266.20	3.18	99%
D1209-ZR-26	59.6950	75.4905	90.0471	0.1665	0.0015	10.8681	0.1149	0.4722	0.0034	2524.07	15.43	2511.91	9.83	2493.39	15.02	99%

续表 2-1

测点编号	Pb 总量 / 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度				
				$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ					
D1209-ZR-27	32.1471	263.3946	20.4377	0.1111	0.0019	4.8787	0.0888	0.3195	0.0035	1817.59	30.40	1798.58	15.33	1787.37	17.04	99%
D1209-ZR-28	181.5750	161.9813	343.4848	0.1416	0.0011	7.9987	0.0672	0.4088	0.0026	2247.23	12.96	2230.87	7.58	2209.42	12.07	99%
D1209-ZR-29	83.9680	110.4953	182.0633	0.1187	0.0010	5.7707	0.0554	0.3516	0.0024	1936.73	13.43	1942.02	8.31	1942.30	11.38	99%
D1209-ZR-30	108.7224	105.8084	275.6014	0.1142	0.0009	5.0465	0.0422	0.3197	0.0018	1933.34	13.89	1827.16	7.09	1788.07	8.69	97%
D1209-ZR-31	45.1115	97.5518	92.4747	0.1166	0.0011	5.4777	0.0558	0.3403	0.0023	1905.56	16.97	1897.10	8.75	1887.97	10.86	99%
D1209-ZR-32	22.7553	51.4091	46.8844	0.1135	0.0013	5.2773	0.0661	0.3370	0.0027	1857.41	20.68	1865.20	10.69	1872.27	13.22	99%
D1209-ZR-33	28.4751	391.5690	535.4970	0.0516	0.0022	0.2998	0.0131	0.0421	0.0005	333.39	98.14	266.24	10.22	265.87	3.33	99%
D1209-ZR-34	72.5584	51.5301	135.8869	0.1470	0.0012	8.6128	0.0860	0.4242	0.0031	2310.80	14.51	2297.90	9.08	2279.47	14.13	99%
D1209-ZR-35	195.0918	179.2436	353.4201	0.1495	0.0012	8.7357	0.0852	0.4226	0.0029	2340.44	13.12	2310.80	8.88	2272.17	13.06	98%
D1209-ZR-36	72.8968	108.2938	171.3359	0.1137	0.0011	5.0796	0.0508	0.3235	0.0021	1861.12	17.13	1832.71	8.49	1806.66	10.06	98%
D1209-ZR-37	156.1086	95.8714	254.2172	0.1631	0.0014	10.6534	0.1040	0.4723	0.0031	2487.96	14.51	2493.37	9.06	2493.81	13.64	99%
D1209-ZR-38	124.2249	85.6137	311.5055	0.1157	0.0010	5.2647	0.0554	0.3289	0.0025	1900.00	14.66	1863.16	8.98	1833.27	12.07	98%
D1209-ZR-39	75.0994	43.4345	192.3077	0.1132	0.0010	5.0903	0.0533	0.3251	0.0025	1853.71	48.61	1834.49	8.88	1814.50	12.02	98%
D1209-ZR-40	155.2846	127.4414	280.2891	0.1468	0.0011	8.6436	0.0795	0.4256	0.0028	2308.34	12.97	2301.16	8.37	2285.89	12.83	99%
D1209-ZR-41	149.2137	72.9389	293.9772	0.1415	0.0012	7.7926	0.1073	0.3966	0.0040	2255.56	14.97	2207.35	12.39	2153.38	18.59	97%
D1209-ZR-42	66.7472	77.5492	159.9826	0.1124	0.0010	5.0623	0.0522	0.3254	0.0023	1838.89	10.34	1829.81	8.74	1815.85	11.33	99%
D1209-ZR-43	45.8008	42.6241	76.1644	0.1537	0.0015	9.4954	0.1000	0.4473	0.0036	2387.35	15.58	2387.10	9.67	2383.08	15.94	99%
D1209-ZR-44	57.8761	509.1881	1231.8350	0.0519	0.0016	0.2977	0.0089	0.0415	0.0004	279.69	68.51	264.61	6.97	262.12	2.37	99%
D1209-ZR-45	19.7628	21.2375	50.0959	0.1051	0.0013	4.4866	0.0556	0.3095	0.0026	1716.67	22.22	1728.50	10.29	1738.36	12.59	99%
D1209-ZR-46	42.1734	64.3641	90.7243	0.1169	0.0012	5.5016	0.0634	0.3402	0.0025	1909.26	13.89	1900.85	9.91	1887.56	11.84	99%
D1209-ZR-47	4.5803	25.4012	75.8004	0.0526	0.0016	0.3598	0.0106	0.0499	0.0005	322.28	73.14	312.09	7.90	314.11	3.26	99%
D1209-ZR-48	141.3423	14.5123	415.2304	0.1108	0.0010	4.4794	0.0457	0.2918	0.0019	1813.27	17.75	1727.15	8.46	1650.46	9.31	95%
D1209-ZR-49	56.0170	33.6775	138.3290	0.1143	0.0011	5.1774	0.0533	0.3274	0.0023	1869.45	16.67	1848.90	8.76	1825.80	11.34	98%
D1209-ZR-50	85.0941	38.9552	227.6594	0.1107	0.0010	4.7504	0.0487	0.3103	0.0022	1810.80	16.51	1776.17	8.60	1742.16	11.02	98%
D1209-ZR-51	41.4356	48.7151	93.2672	0.1155	0.0011	5.4324	0.0618	0.3401	0.0027	1887.35	17.90	1889.98	9.76	1887.26	12.84	99%
D1209-ZR-52	108.7944	73.4354	188.5159	0.1521	0.0013	9.2966	0.0922	0.4420	0.0032	2368.83	13.89	2367.68	9.10	2359.54	14.51	99%
D1209-ZR-53	81.9878	53.8651	144.1693	0.1531	0.0013	9.3411	0.0998	0.4411	0.0035	2381.17	14.81	2372.07	9.80	2355.46	15.57	99%

续表 2-2

测点编号	Pb 总量 / 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/10^{-6}$	$^{238}\text{U}/10^{-6}$	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度				
				$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$						
				1 σ	Pb/ U	1 σ	Pb/ U	1 σ	Pb/ U	1 σ	Pb/ U					
D1209-ZR-54	27.3875	26.9892	56.1519	0.1423	0.0016	7.4938	0.0945	0.3811	0.0031	2255.25	19.91	2172.25	11.30	2081.23	14.46	95%
D1209-ZR-55	142.6531	22.4486	373.0652	0.1171	0.0011	5.2913	0.0642	0.3260	0.0026	1912.65	15.59	1867.46	10.37	1818.75	12.48	97%
D1209-ZR-56	55.6517	147.2204	112.7513	0.1133	0.0012	5.0290	0.0604	0.3215	0.0027	1853.71	18.52	1824.21	10.17	1797.03	13.14	98%
D1209-ZR-57	29.5947	43.3335	68.7130	0.1137	0.0014	5.0588	0.0712	0.3221	0.0030	1858.34	21.61	1829.22	11.93	1800.02	14.40	98%
D1209-ZR-58	26.8161	38.9132	44.5672	0.1485	0.0017	8.6251	0.1211	0.4202	0.0039	2328.71	20.53	2299.21	12.78	2261.55	17.91	98%
D1209-ZR-59	120.7719	121.5650	258.5451	0.1252	0.0012	6.1835	0.0682	0.3570	0.0025	2032.41	16.67	2002.12	9.64	1968.03	11.85	98%
D1209-ZR-60	53.7570	607.3907	1041.3422	0.0528	0.0017	0.3064	0.0096	0.0420	0.0004	320.43	67.59	271.39	7.45	265.04	2.76	97%
D1209-ZR-61	5.0419	41.5770	81.0287	0.0562	0.0020	0.3870	0.0131	0.0502	0.0006	457.45	105.54	332.20	9.60	315.59	3.67	94%
D1209-ZR-62	79.5619	34.8702	196.5551	0.1157	0.0010	5.4340	0.0557	0.3398	0.0023	1891.67	16.67	1890.23	8.78	1885.64	11.21	99%
D1209-ZR-63	73.4407	73.1846	185.0000	0.1131	0.0010	5.0672	0.0637	0.3238	0.0030	1850.31	15.59	1830.63	10.66	1808.15	14.83	98%
D1209-ZR-64	10.5198	89.0307	172.5671	0.0525	0.0014	0.3586	0.0093	0.0496	0.0004	309.32	56.48	311.16	6.98	311.90	2.62	99%
D1209-ZR-65	77.9394	91.4639	186.3087	0.1125	0.0011	5.0955	0.0554	0.3276	0.0023	1842.60	12.19	1835.36	9.22	1826.50	11.27	99%
D1209-ZR-66	72.1391	71.0911	152.8164	0.1242	0.0011	6.3587	0.0662	0.3703	0.0024	2016.97	-16.82	2026.58	9.13	2030.64	11.52	99%
D1209-ZR-67	47.5594	60.0331	73.4805	0.1603	0.0016	10.2019	0.1261	0.4602	0.0039	2461.11	16.98	2453.25	11.43	2440.52	17.05	99%
D1209-ZR-68	127.6817	79.6232	284.0655	0.1234	0.0012	6.2857	0.0739	0.3682	0.0028	2005.87	22.68	2016.47	10.29	2020.98	13.08	99%
D1209-ZR-69	98.3863	38.6754	186.9778	0.1479	0.0015	8.7930	0.0978	0.4299	0.0030	2321.92	16.52	2316.76	10.14	2305.14	13.31	99%
D1209-ZR-70	248.7476	687.4085	608.3026	0.1379	0.0013	5.6825	0.0657	0.2982	0.0027	2201.54	16.36	1928.71	9.99	1682.57	13.48	96%
D1209-ZR-71	39.3071	720.1133	704.3237	0.0510	0.0018	0.2970	0.0109	0.0421	0.0004	238.96	76.84	264.04	8.57	265.67	2.66	99%
D1209-ZR-72	62.2070	489.4366	1240.5690	0.0515	0.0020	0.2973	0.0107	0.0418	0.0004	264.88	87.02	264.32	8.38	264.09	2.19	99%
D1209-ZR-73	68.6284	89.5522	109.5128	0.1510	0.0014	9.2543	0.1067	0.4431	0.0034	2357.10	15.28	2363.50	10.56	2364.62	15.38	99%
D1209-ZR-74	165.6454	168.3436	329.5594	0.1568	0.0013	8.5383	0.0859	0.3937	0.0028	2421.30	13.89	2290.01	9.14	2140.13	12.95	93%
D1209-ZR-75	12.5215	157.1142	231.9714	0.0525	0.0012	0.3026	0.0070	0.0418	0.0004	305.62	56.48	268.45	5.46	263.82	2.32	98%
D1209-ZR-76	24.2752	76.3230	41.7651	0.1174	0.0014	5.5362	0.0762	0.3415	0.0029	1916.36	22.38	1906.24	11.83	1894.07	14.09	99%
D1209-ZR-77	28.4029	47.1700	64.8316	0.1105	0.0012	4.8510	0.0548	0.3175	0.0021	1809.26	18.52	1793.80	9.50	1777.71	10.48	99%
D1209-ZR-78	19.4690	244.1538	282.8908	0.0552	0.0010	0.3829	0.0073	0.0502	0.0004	420.42	36.11	329.16	5.33	315.58	2.44	95%
D1209-ZR-79	13.3270	212.2083	235.7877	0.0513	0.0031	0.2913	0.0163	0.0417	0.0008	253.77	140.72	259.58	12.79	263.52	4.90	98%
D1209-ZR-80	16.4316	186.5660	193.6192	0.0542	0.0010	0.4508	0.0082	0.0603	0.0005	388.94	38.89	377.84	5.76	377.59	2.93	99%

续表 2-3

测点编号	Pb 总量 / 10^{-6}	同位素比值				同位素年龄/Ma				谐和度
		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	
D1209-ZR-81	78.6988	0.1182	0.0011	5.4450	0.3332	0.0025	1891.96	9.26	1853.95	97%
D1209-ZR-82	49.0800	0.1163	0.0012	5.4673	0.3397	0.0028	1895.48	10.79	1885.03	99%
D1209-ZR-83	104.9788	0.1090	0.0010	3.7660	0.2499	0.0015	1585.53	7.55	1438.11	90%
D1209-ZR-84	217.5627	0.1511	0.0012	9.2976	0.4449	0.0030	2367.78	8.46	2372.57	99%
D1209-ZR-85	45.8769	0.1472	0.0016	8.4849	0.4129	0.0047	2284.31	16.42	2228.38	97%
D1209-ZR-86	102.2228	0.1371	0.0011	7.4168	0.3910	0.0026	2163.00	8.76	2127.33	98%
D1209-ZR-87	170.2591	0.1138	0.0009	5.0211	0.3189	0.0020	1822.89	7.45	1784.47	97%
D1209-ZR-88	111.5994	0.1477	0.0012	8.7627	0.4288	0.0033	2313.63	9.36	2300.20	99%
D1209-ZR-89	290.3247	0.1158	0.0009	5.3426	0.3337	0.0022	1875.71	7.54	1856.20	98%
D1209-ZR-90	28.9287	0.1170	0.0013	5.4863	0.3397	0.0027	1898.45	10.04	1885.42	99%
D1209-ZR-91	14.8033	0.1635	0.0023	10.7013	0.4747	0.0054	2497.54	14.74	2504.04	99%
D1209-ZR-92	33.6304	0.1149	0.0017	5.3343	0.3367	0.0032	1874.37	13.43	1870.64	99%
D1209-ZR-93	149.9575	0.1478	0.0012	8.6845	0.4248	0.0029	2305.45	8.99	2282.07	98%
D1209-ZR-94	83.5312	0.1164	0.0010	5.3208	0.3307	0.0026	1872.21	8.99	1841.66	98%
D1209-ZR-95	52.6111	0.0546	0.0017	0.3171	0.0422	0.0004	279.63	7.45	266.17	95%
D1209-ZR-96	132.4381	0.1185	0.0010	5.7354	0.3499	0.0024	1936.73	8.40	1934.28	99%
D1209-ZR-97	33.0455	0.1488	0.0014	8.8282	0.4296	0.0030	2320.41	8.81	2303.96	99%
D1209-ZR-98	397.0773	0.1469	0.0011	6.2204	0.3060	0.0020	2007.32	7.87	1721.00	92%
D1209-ZR-99	48.1618	0.1134	0.0011	4.9485	0.3159	0.0024	1810.58	8.71	1769.70	97%
D1209-ZR-100	37.3901	0.1175	0.0014	5.5068	0.3393	0.0026	1901.66	10.89	1883.52	99%
D1209-ZR-101	78.6230	0.1115	0.0010	4.8445	0.3140	0.0025	1792.66	9.32	1760.44	98%
D1209-ZR-102	148.3262	0.1557	0.0014	9.6729	0.4491	0.0029	2404.13	8.88	2391.19	99%
D1209-ZR-103	247.5092	0.1603	0.0014	8.0430	0.3625	0.0022	2235.86	8.55	1993.84	90%
D1209-ZR-104	62.7281	0.1130	0.0011	5.1203	0.3275	0.0031	1839.47	10.39	1826.34	99%
D1209-ZR-105	116.1956	0.1654	0.0014	10.7918	0.4716	0.0036	2505.36	9.75	2490.74	99%
D1209-ZR-106	69.6179	0.1657	0.0014	10.8228	0.4722	0.0034	2508.03	9.32	2493.30	99%
D1209-ZR-107	189.5291	0.1210	0.0009	5.8543	0.3497	0.0021	1954.48	7.30	1933.29	98%
D1209-ZR-108	120.5964	0.1020	0.0008	3.3307	0.2363	0.0016	1488.27	7.18	1367.21	91%
D1209-ZR-109	36.6480	0.0511	0.0015	0.2959	0.0085	0.0004	263.22	6.66	265.84	99%
D1209-ZR-110	141.2069	0.1515	0.0012	9.3085	0.4443	0.0031	2368.85	8.59	2369.92	99%
D1209-ZR-111	35.5044	0.1068	0.0012	4.5443	0.3078	0.0024	1739.11	10.20	1729.66	99%
D1209-ZR-112	25.0738	0.0518	0.0023	0.3025	0.0141	0.0006	268.36	10.96	266.77	99%

5 结 论

(1) 青藏高原东北缘烟筒山构造带二叠系红泉组底部含凝灰质不等粒岩屑长石砂岩碎屑锆石年龄序列最年轻的年龄峰值为 264 Ma, 确定二叠系红泉组的沉积时代应归为中二叠世末—晚二叠世。

(2) 青藏高原东北缘烟筒山构造带二叠系红泉组碎屑锆石年龄序列与华北克拉通西部北缘基底的年龄序列基本一致, 而与阿拉善地块基底、北祁连地区基底锆石年龄序列完全不同, 证明二叠系红泉组的沉积物源主要来自北东方向的华北克拉通西部北缘基底隆起带。

致谢:感谢中国地质科学院地质力学研究所胡健民研究员提出的宝贵意见, 感谢河北省区域地质调查研究院测试分析实验室在样品处理、测试过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] Deng Q D, Sung F M, Zhu S L, et al. Active faulting and tectonics of the Ningxia-Hui autonomous region, China[J]. Journal of Geophysical Research(Solid Earth), 1984, 89(B6): 4427-4445.
- [2] 周特先, 王利, 曹明志. 宁夏构造地貌格局及其形成与发展[J]. 地理学报, 1985, 52(3): 215-224.
- [3] 张珂, 刘开瑜, 吴加敏, 等. 宁夏中卫盆地的沉积特征及其所反映的新构造运动[J]. 沉积学报, 2004, 22(3): 465-473.
- [4] 王伟涛. 宁夏南部新生代盆地沉积演化及其对青藏高原东北角构造变形的响应[J]. 国际地震动态, 2012, 10: 40-43.
- [5] 宁夏回族自治区地质调查院. 宁夏回族自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 1-916.
- [6] 葛肖虹, 刘俊来. 北祁连造山带的形成与背景[J]. 地学前缘, 1999, 6(4): 223-230.
- [7] 葛肖虹, 任收麦, 刘永江, 等. 中国西部的大陆构造格架[J]. 石油学报, 2001, 1(22): 1-5.
- [8] 李锦轶, 张进, 曲军锋. 华北与阿拉善两个古陆在早古生代晚期拼合——来自宁夏牛首山沉积岩系的证据[J]. 地质论评, 2012, 58(27): 208-214.
- [9] 郑孟林, 金之钧, 王毅, 等. 鄂尔多斯盆地北部中新世构造特征及其演化[J]. 地球科学与环境学报, 2006, 28(3): 31-36.
- [10] 王伟涛, 张培震, 郑德文, 等. 青藏高原东北缘海原断裂带晚新生代构造变形[J]. 地学前缘, 2014, 21(4): 266-274.
- [11] 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. 第四纪研究, 2006, 26(1): 5-13.
- [12] Shi W, Hu J M, Chen H, et al. Cenozoic Tectonic Evolution of the Arcuate Structures in the Northeast Tibetan Plateau [J]. Acta Geologica Sinica(English Edition), 2015, 89(2): 676-677.
- [13] Lin X B, Chen H L, Wyrwoll K H, et al. Commencing uplift of the Liupan Shan since 9.5 Ma: Evidences from the Sikouzi section at its east side[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 37: 350-360.
- [14] Anderson T. Correction of Common lead in U-Pb Analyses that Do not Report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192(1/2): 59-79.
- [15] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of Zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(15): 1535-1546.
- [16] Ludwig K R. User's Manual for Isoplot 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, 2003.
- [17] 侯可军, 李延河, 邹天人, 等. LA-MC-ICP-MS 锆石 Hf 同位素的分析方法及地质应用[J]. 岩石学报, 2007, 23(10): 2595-2604.
- [18] Cohen K M, Finney S C, Gibbard P L, et al. The ICS international Chronostratigraphic Chart[J]. Episodes, 2013, 36: 199-204.
- [19] Zhang C L, Ye X T, Zou H B, et al. Neoproterozoic sedimentary basin evolution in southwestern Tarim, NW China: New evidence from field observations, detrital zircon U-Pb ages and Hf isotope compositions[J]. Precambrian Research, 2016, 280: 31-45.
- [20] 张建新, 李怀坤, 孟繁聪, 等. 塔里木盆地东南缘(阿尔金山)“变质基底”记录的多期构造热事件: 锆石 U-Pb 年代学的制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(1): 23-46.
- [21] 孙迪, 冯乔, 刘震, 等. 鄂尔多斯盆地西南部上三叠统延长组碎屑锆石 U-Pb 定年及其物源意义[J]. 地质学报, 2017, 91(11): 2521-2544.
- [22] 杨华, 辛补社, 付金华, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘崆峒山组砾岩中的碎屑锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其构造意义[J]. 地质论评, 2014, 60(3): 677-692.
- [23] 吴素娟, 张永生, 邢恩袁. 鄂尔多斯盆地变质基底中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 地质学报, 2015, 89(11): 2171-2186.
- [24] 靳立杰, 王继林, 赵体群, 等. 东昆仑地区沙松乌拉组物质来源及源区构造—热事件——来自碎屑锆石 U-Pb 年代学的证据[J]. 地质通报, 2020, 39(7): 1025-1034.
- [25] 张海华, 张健, 黄欣, 等. 大兴安岭中部乌兰浩特地区林西组碎屑锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. 地质通报, 2019, 38(9): 1484-1500.
- [26] 王剑, 曾胜强, 付修根, 等. 羌塘盆地埃纳湖组时代归属新证据[J]. 地质通报, 2019, 38(7): 1256-1258.
- [27] 胡健民, 刘新社, 李振宏, 等. 鄂尔多斯盆地基底变质岩与花岗岩锆石 SHRIMP-U-Pb 定年[J]. 科学通报, 2012, 57(26): 2482-2491.
- [28] Darby B J, Gehrels G. Detrital zircon reference for the North China block[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26: 637-648.
- [29] 张进, 李锦轶, 刘建峰, 等. 早古生代阿拉善地块与华北地块之间的关系: 来自阿拉善东缘中奥陶统碎屑锆石的信息[J]. 岩石学报, 2012, 28(9): 2912-2934.
- [30] 宫江华, 张建新, 于胜尧, 等. 阿拉善地块南缘龙首山岩群及相关岩石的起源和归属——来自 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(5): 795-818.
- [31] 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪, 等. 祁连地块前寒武纪基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2007, 52(13): 1572-1585.
- [32] Shu G S, Yao L N, Li S, et al. Tectonics of the North Qilian orogen, NW China[J]. Gondwana Research, 2013, 23: 1378-1401.
- [33] 董晓朋. 华北克拉通西部新元古代沉积格局及大地构造意义[D]. 中国地质大学(武汉)博士学位论文, 2018.
- [34] 朱如凯, 许怀先, 邓胜徽, 等. 中国北方地区二叠纪岩相古地理[J]. 古地理学报, 2007, 9(2): 133-142.