

DOI: 10.12401/j.nwg.2023062

西秦岭白龙江地区志留系迭部组岩石地球化学特征 及碎屑锆石原位 U-Pb 年代学研究

俞胜¹, 贾轩¹, 姚皓骞², 徐磊^{3,*}, 赵斌斌¹, 贾新勇¹

(1. 甘肃省地质矿产勘查开发局第二地质矿产勘查院, 甘肃 兰州 730020; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 白龙江地区志留系迭部组浅变质碎屑岩微量元素地球化学指示其物源主要来自上地壳长英质岩浆岩, 源区与活动大陆边缘背景密切相关。迭部组 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年代学显示年龄值跨度较大, 最小年龄为 440 Ma, 指示其沉积时代不早于早志留世, 结合区域化石资料限定迭部组为早志留世。碎屑锆石 U-Pb 年龄可分出 440~680 Ma、798~876 Ma、1 012~1 291 Ma、1 590~1 990 Ma、2 113~2 455 Ma 等 5 个峰值年龄区间, 显示区内沉积物源具有多源多时代地质体的贡献特征。其中, 最高峰值 440~680 Ma (占总有效数据 76.9%) 的年龄谱图与北秦岭微地块吻合度高, 显示迭部组沉积物源主要来自北秦岭微地块, 而其他组少量峰值碎屑锆石年龄则显示南秦岭微地块、扬子地块, 北祁连东段可能参与了部分物源供给。

关键词: 迭部组; 地球化学; 碎屑锆石; U-Pb 年代学

中图分类号: P595

文献标志码: A

文章编号: 1009-6248(2023)05-0245-17

Geochemistry Characteristics and Detrital Zircon In-Site U-Pb Geochronology of Silurian Diebu Formation in Bailongjiang Area, West Qinling Mountains

YU Sheng¹, JIA Xuan¹, YAO Haoqian², XU Lei^{3,*}, ZHAO Binbin¹, JIA Xinyong¹

(1. The Second Institute of Geology and Minerals Exploration, Gansu Provincial Bureau of Geology and Minerals Exploration and Development, Lanzhou 730020, Gansu, China; 2. School of Earth Science and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083; 3. Geological Survey of Gansu Province, Lanzhou 730000, Gansu, China)

Abstract: Trace element geochemistry of the shallow metamorphic clastic rocks of the Silurian Diebu Formation in the Bailongjiang area indicates that their provenance is mainly derived from felsic magmatic rocks in the upper crust, and the source area is closely related to the background of the active continental margin. LA-ICP-MS detrital zircon U-Pb chronology of the Diebu Formation shows a large age span, with a minimum age of 440 Ma, indicating that its sedimentary age is not earlier than the Early Silurian. Combined with regional fossil data, the Diebu Formation is defined as the Early Silurian. The U-Pb ages of detrital zircons can be divided into five peak age ranges of 440~680 Ma, 798~876 Ma, 1 012~1 291 Ma, 1 590~1 990 Ma, and 2 113~2 455

收稿日期: 2023-02-03; 修回日期: 2023-04-07; 责任编辑: 吕鹏瑞

基金项目: 甘肃省科技计划项目“甘肃北山成宣镁铁质-超镁铁质杂岩体成因与找矿潜力研究”(21JR7RA787), 甘肃省自然资源厅项目“甘肃省迭部县尖尼-洛大地区 1:5 万矿产远景调查”(甘国土资财发[2015]16 号、甘国土资财发[2016]15 号、甘财经二[2017]62 号)联合资助。

作者简介: 俞胜(1984-), 男, 高级工程师, 长期从事区域地质矿产调查与研究工作。E-mail: 78181205@qq.com。

* 通讯作者: 徐磊(1986-), 男, 高级工程师, 长期从事区域地质矿产调查相关工作。E-mail: 397315452@qq.com。

Ma, indicating that the sediment sources in the area have the contribution characteristics of multiple sources and multiple ages of geological bodies. The age spectrum with the highest peak value of 440~680 Ma (accounting for 76.9% of the total effective data) is highly consistent with the north Qinling microblock, indicating that the sediment sources of the Diebu Formation mainly come from the north Qinling microblock, while a small amount of peak clastic zircon ages of other groups indicate that the south Qinling microblock, the Yangtze block, the eastern section of the north Qilian mountains may participate in some source supply.

Keywords: Diebu Formation; geochemistry; detrital zircon; U-Pb chronology

当前,对沉积盆地沉积碎屑岩的化学组分和碎屑锆石物源示踪研究已成为盆山耦合研究的主流方法(肖庆辉等,1995;闫义等,2003)。沉积碎屑岩的组分特征能够通过化学组分很好地反映(Dickinson,1985),其地球化学特征在一定程度上反映了沉积物母岩特性和构造环境。近年来,通过碎屑岩微量、稀土元素进行沉积物源研究取得良好的效果(董顺利,2013;徐多勋等,2020)。碎屑锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 年代学研究方法已成为当前国内外学者开展古地理还原和古构造单元分析对比的主要方法手段,与传统测年方法对比,碎屑锆石具有稳定性强、富含放射性元素、不受部分熔融或变质作用的影响而能够保存源区岩石重要信息等特征,其 U-Pb 年代学方法具有不可替代的优势(彭守涛等,2009)。

秦岭造山带作为中国中央造山带的中段,经历了长期复杂的构造运动,是中国中央造山带的重要组成部分(姜寒冰等,2023)。前人在南秦岭、北秦岭微地块及其邻区北祁连东段、扬子地块北缘、华北地块南缘的不同层位、不同地质体中投入了大量的物源示踪相关研究工作,取得了一定的进展(李怀坤等,2003;闫全人等,2007;祝禧艳等,2008;徐学义等,2009;王清海等,2011;林振文等,2013;敖文昊等,2014;徐通,2016;刘仁燕等,2020;李平等,2023),但相关认识分歧较多,如南秦岭微地块南北两侧的“商丹洋”、“勉略洋”的存在时限、闭合时限均有不同的认识,从而限制了提供沉积物源的可能性。研究区所属的南秦岭微地块志留系中物源示踪工作研究鲜有报道,前人对研究区志留系迭部组的沉积时代主要参照区域地质调查和化石资料对比等,缺少相关同位素年代学证据。笔者试图通过对白龙江地区志留系迭部组浅变质碎屑岩进行微量稀土测试及碎屑锆石 LA-ICP-MS 原位 U-Pb 测年分析,结合区域上前人已有的研究成果,限定迭部组沉积时限,对迭部组的沉积物源区及其构造意义进行讨论分析,为研究和认识白龙江地区早古生代地层构造属性和西秦岭造山带构

造演化提供科学依据。

1 区域地质背景

研究区位于西秦岭地区迭部县尖尼-洛大一带,大地构造地处西秦岭造山带之南秦岭微地块,北以商丹缝合带与西秦岭之北秦岭微地块及祁连造山带拼接,南以勉略缝合带与扬子板块之碧口微地块相连。本区属西秦岭造山带的主体,先后经历了多期多次、不同属性的构造运动,构造变形复杂。

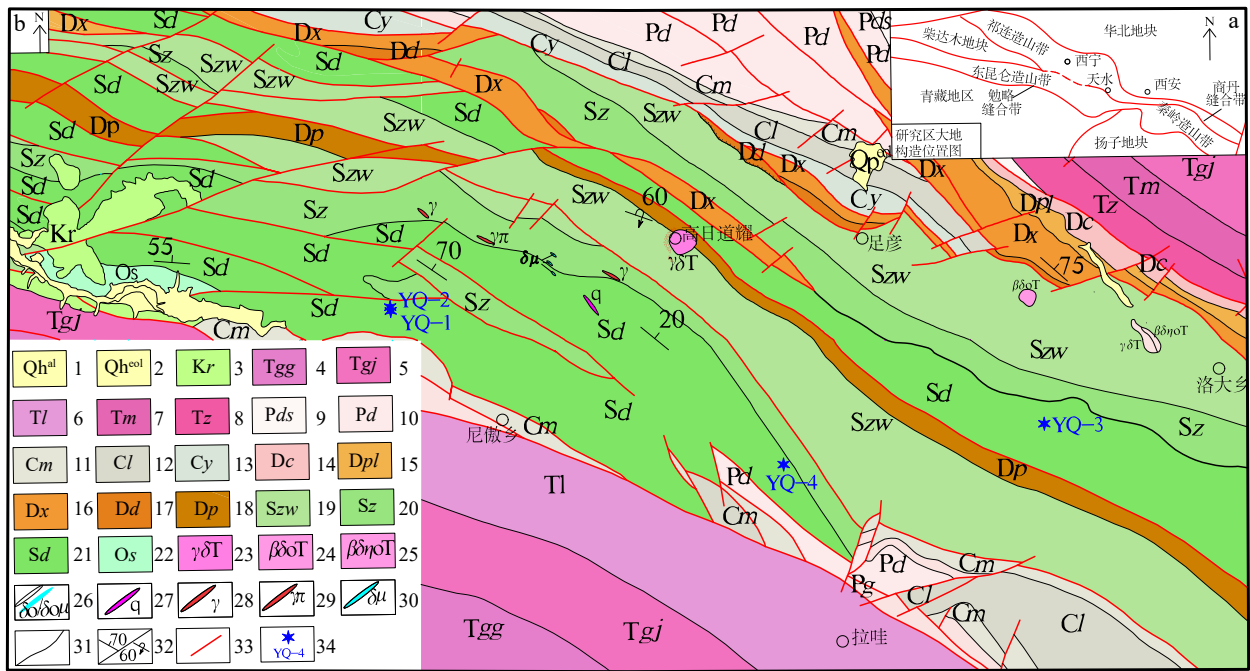
区域地层出露以早古生代志留系为主,次有晚古生界、中生界。志留系在区内出露较为完整,层序清晰,属浅变质岩系列,厚度大,构成了白龙江背斜的核部及两翼地层,总体为一套复理石建造,由老到新依次分为迭部组、舟曲组、卓乌阔组(图1)。区域岩浆岩活动较弱,以三叠纪侵入的花岗闪长岩、石英闪长岩、石英二长闪长岩及石英二长岩等中酸性为主,一般以小岩株状侵位于志留系、泥盆系浅变质地层中。断裂构造以北西向为主,次为北东向。

志留系迭部组最早为翟玉沛在1977年研究西秦岭志留系时所命名的迭部群,被定义为一套海相碎屑岩夹少量硅质岩及火山岩沉积。《甘肃省岩石地层》将迭部群厘定为迭部组(表1)(甘肃省地矿局,1997),定义为一套深灰色千枚岩、变砂岩、黑灰色含碳硅质板岩、硅质岩为主夹有白云质灰岩、白云岩,属于笔石相沉积。其与下伏奥陶系苏里木塘组、上覆舟曲组呈整合接触关系,沿甘肃省迭部县、舟曲县和武都市大量出露,向东经甘肃省康县延入陕西省境内。

2 样品描述及分析技术

2.1 样品描述

为了确保样品的代表性和分析结果的准确性,本次研究选择志留系迭部组出露的浅变质碎屑岩新鲜面、后期脉体不发育、连续沉积广泛发育的地段系统



1.第四系全新统; 2.第四系更新统; 3.白垩系热当坝组; 4.三叠系光盖山组; 5.三叠系郭家山组; 6.三叠系隆务河组; 7.三叠系马热松多组; 8.三叠系扎里山组; 9.二叠系迭山组; 10.二叠系大关山组; 11.石炭系岷河组; 12.石炭系略阳组; 13.石炭系益哇沟组; 14.石炭系擦阔合组; 15.石炭系蒲莱组; 16.石炭系下吾那组; 17.泥盆系当多组; 18.泥盆系普通沟组; 19.志留系卓乌阔组; 20.志留系舟曲组; 21.志留系迭部组; 22.奥陶系苏里木塘组; 24.三叠纪黑云母石英闪长岩; 25.三叠纪黑云母石英闪长岩; 26.石英闪长岩脉/石英闪长玢岩脉; 27.石英脉; 28.花岗岩脉; 29.花岗岩斑岩脉; 30.闪长玢岩脉; 31.地质界线; 32.正常/倒转岩层产状; 33.断层; 34.采样位置及编号

图 1 研究区地质简图(角图据李亦飞等, 2018)

Fig. 1 Geological map of the study area

表 1 志留系迭部组划分沿革表

Tab. 1 Stratigraphic division and evolution of Silurian Diebu Formation

地层	划分机构(时间)					
	叶连俊等(1945)	穆恩之(1992)	翟玉沛(1977)	原西安地质矿产研究所(1989)	川西北地质大队(1990)	《甘肃省岩石地层》(1997)
志留系 下统	白龙江系	白龙江群	迭部群	迭部群(尖尼沟组、各子组、安子沟组)	白龙江群	下地组 拉垅组 迭部组 塔尔组

采集样品。采集微量、稀土元素样品 4 件(编号分别为 YQ-1、YQ-2、YQ-3、YQ-4)及碎屑锆石测年样品(编号 TW-1, 岩性及采样位置与 YQ-2 一致)。

YQ-1 样品(采样位置为 N 34°00'57", E 103°28'53")为黑色碳硅质板岩, 具隐晶质结构和板状构造, 矿物成分主要由石英(65%±)、碳质(33%±)和少量绢云母(2%±)组成。石英和碳质为非常细小的晶体团粒, 几乎为隐晶质, 边缘和界线模糊不清。石英呈隐晶质, 他形粒状、不规则粒状。碳质呈隐晶质, 与石英一起略显定向。岩石后期有粒度较粗的石英脉斜切板粒状。

YQ-2(TW-1)样品(采样位置为 N 34°01'04", E

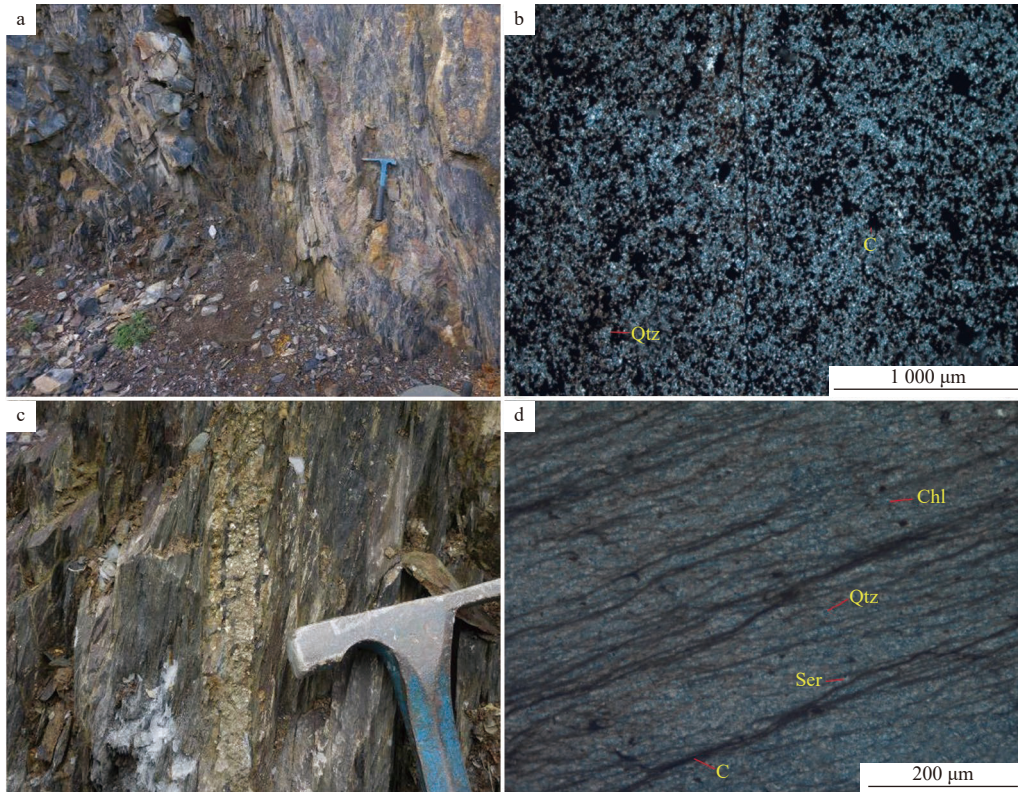
103°28'52")与 YQ1 岩性相似, 黑色碳硅质板岩, 具隐晶质结构和板状构造, 矿物成分主要由石英(65%±)、碳质(34%±)和少量绢云母(1%±)组成。石英和碳质呈非常细小的晶体团粒, 几乎为隐晶质, 边缘和界线模糊不清。石英呈隐晶质, 他形粒状、不规则粒状; 绢云母呈显微隐晶质、鳞片状集合体、片径大多为 0.004~0.03 mm、定向性不强; 碳质呈隐晶质与石英一起略显定向。

YQ-3 样品(采样位置为 N 33°57'31", E 103°52'37")为灰黑色绢云母泥质板岩, 具变余泥状结构和板状构造, 矿物成分主要由泥质-隐晶质矿物(68%±)、绢云

母(15%±)、石英(12%±)和绿泥石(3%±)组成,其次为少量碳质(1%±)和自形立方体晶形黄铁矿(1%±)。

YQ-4 样品(采样位置为 N 33°56'18", E 103°43'09")

为深灰色千枚状泥质板岩,具变余泥状结构和板状构造,由泥质-隐晶质矿物(45%±)、绢云母(42%±)、石英(10%±)、绿泥石(3%±)及微量铁质等组成(图 2)。



a.碳硅质板岩野外照片; b.YQ-2 正交偏光照片; c.千枚状泥质板岩; d.YQ-4 正交偏光照片;
Qtz.石英; Ser.绢云母; Chl.绿泥石; C.碳质

图 2 选部组岩石野外照片和显微镜下图

Fig. 2 Field photos and micrographs of Diebu Formation rocks

2.2 测试方法

岩石微量、稀土元素样品的测试分析由核工业地质局分析测试研究中心完成,采用 Agilent 7500a 型 ICP-MS 仪测定,分析精度误差一般小于 5%。分析数据详见表 2。

锆石 U-Pb 法(LA-ICP-MS)同位素测年样品前期挑选、制靶等工作在北京天和信矿业技术开发有限公司实验室完成,样品通过粉碎、重选、磁选等常规程序分选、提纯,使用双目镜检查后手工挑选出晶形较为完整、透明度好、无明显裂隙和包裹体的锆石颗粒粘贴在环氧树脂上制靶。锆石经过打磨抛光等程序使其内部结构充分暴露,进行阴极发光(CL)显微图像、显微照相和激光剥蚀电感耦合等离子体质谱仪进行 U-Pb 年龄测试,该项工作在南京大学实验室完成。激光剥蚀系统为 Geolas200M, ICP-MS 仪为 Agilent7500a,激光剥蚀束斑直径为 30 μm,激光脉冲

为 10 Hz,激光剥蚀样品的深度为 20~40 μm。样品同位素比值和元素含量数据处理采用 GLITTER 软件,采用 Andersen 对测试数据进行普通铅校正,年龄计算机谐和图采用 Isoplot 软件完成,详见参考文献(Ander-son, 2002)。按照碎屑锆石年龄分布范围,对于大于 1000 Ma 的测点,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄;年龄小于 1000 Ma 的测点,采用更为可靠的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄(吴元保等, 2004)。碎屑锆石 U-Pb 分析数据见表 3,典型的锆石阴极发光图像如图 3 所示。

3 测试结果

3.1 浅变质碎屑岩微量、稀土元素特征

3.1.1 风化作用和分选

浅变质碎屑岩的化学成分主要取决于源岩的化学成分,与成岩相关的风化、搬运等地质作用也不容

表 2 稀土及微量元素分析结果表(10⁻⁶)

Tab. 2 Analysis results of rare earth and trace elements (10⁻⁶)

样号	YQ-1	YQ-2	YQ-3	YQ-4	样号	YQ-1	YQ-2	YQ-3	YQ-4	样号	YQ-1	YQ-2	YQ-3	YQ-4
Li	9.585	24.76	52.33	89.98	Ba	4 893	9 862	478.8	797.7	Th	9.39	27.32	20.36	24.1
Be	1.379	2.384	2.198	3.092	La	20.6	49.24	42.16	46.05	U	12.59	11.03	3.74	5.065
Sc	5.458	17.44	14.64	20.93	Ce	36.14	95.21	83.4	83.24	∑REE	112.93	264.91	225.31	260.13
Ti	1 450	4 157	4 614	4 362	Pr	4.595	10.28	9.089	10.25	LREE	82.58	199.27	172.84	184.67
V	396.7	204.5	124.5	151	Nd	16.56	35.29	31.36	36.6	HREE	30.35	65.64	52.47	75.46
Cr	29.11	58.48	61.17	108.1	Sm	3.087	6.234	5.547	6.926	(La/Yb)N	10.52	11.81	13.10	9.70
Co	0.409 8	9.034	14.99	18.74	Eu	1.599	3.018	1.285	1.608	(La/Sm)N	4.36	5.17	4.97	4.35
Ni	18.39	44.5	42.35	59.62	Gd	2.699	5.449	4.953	6.543	(Gd/Yb)N	1.59	1.51	1.77	1.59
Cu	25.64	28.67	44.2	46.04	Tb	0.439 4	0.869 5	0.764	1.028	La/Th	2.19	1.80	2.07	1.91
Zn	7.916	62.61	98.11	134.1	Dy	2.267	4.825	4.058	5.689	La/Sc	3.77	2.82	2.88	2.20
Ga	9.346	21.29	20.48	30.17	Ho	0.543 2	1.098	0.880 3	1.248	Co/Th	0.04	0.33	0.74	0.78
Ge	1.903	4.958	6.244	8.296	Er	1.451	3.041	2.563	3.525	Th/U	0.75	2.48	5.44	4.76
As	9.643	5.708	3.539	7.486	Tm	0.259 9	0.503 7	0.365 5	0.565 6	Zr/Sc	11.41	9.93	10.85	7.56
Rb	58.4	153.8	126.7	198.9	Yb	1.404	2.991	2.309	3.404	Th/Sc	1.72	1.57	1.39	1.15
Sr	44.18	95.4	51.39	67.11	Lu	0.255 9	0.501 7	0.377 6	0.565 1					
Y	15.57	28.92	21.56	31.96	Hf	1.733	4.696	4.196	4.654					
Zr	62.29	173.2	158.9	158.2	Ta	0.763 9	1.924	1.697	1.363					
Nb	9.26	24.31	23.07	15.41	W	1.248	2.35	1.577	2.437					
Mo	30.89	13.42	0.187 9	0.204 7	Tl	0.108 9	0.091 11	0.078 03	0.066 4					
Sn	1.503	3.982	3.114	4.161	Pb	15.32	30.92	10.71	8.752					
Cs	3.445	8.966	7.354	12.28	Bi	0.295 3	0.509 6	0.221 2	0.566 2					

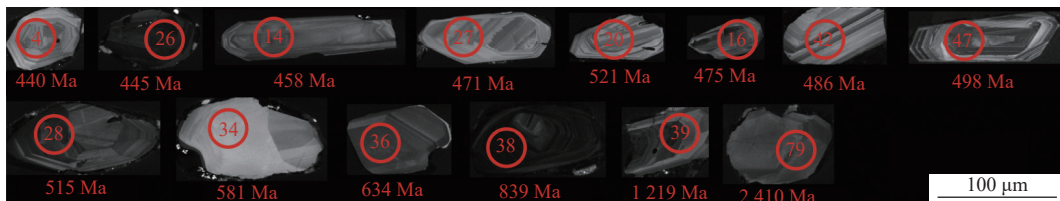


图 3 碎屑锆石阴极发光图像及年龄图

Fig. 3 Zircon cathodoluminescence image

忽视。与源区风化作用相关的信息可借助岩石化学成分来实现, 氧化作用和 U 的丢失对其影响较大, Th/U 值与风化程度呈正相关关系 (McLennan et al., 1993), 一般认为 Th/U 值大于 4, 指示风化作用较强。样品 Th/U-Th 图解显示 (图 4), 志留系迭部组 YQ-1、YQ-2 的 Th/U 值小于 4, 表明其风化程度较弱。YQ-3、YQ-4 的 Th/U 值远大于上地壳的平均值 (3.8), 表明其经历较强的风化作用。

沉积物化学成分的变化、矿物的分选程度可以通过研究 Zr/Sc 和 Th/Sc 值来做出判断, 陆缘碎屑沉积物的 Zr/Sc 和 Th/Sc 值线性正相关关系总体上表明物源区成分具有与岩浆分异相似特征的变化趋势 (McLennan et al., 1993)。

Th/Sc 值能够很好地反映物源区的平均比值, 沉积物的改造、锆石的富集一般与 Zr/Sc 值呈正相关关系 (McLennan et al., 1993)。4 个样品的 Sc 含量远低于上地壳的平均含量, 而其 Zr 含量平均值分别为 $62.29 \times 10^{-6} \sim 173.2 \times 10^{-6}$, 低于或略低于上地壳的平均含量 (190×10^{-6}), 造成 Zr/Sc 值较高。Zr/Sc 和 Th/Sc 值表明迭部组碎屑组分大多没有经历再旋回 (图 5), 指示沉积区距源区一般较近。

3.1.2 碎屑岩源岩类型

前人通过研究稀土元素的配分型式来判别沉积物物源性质 (McLennan et al., 1993)。4 个样品的稀土元素含量、特征比值 (表 2) 和球粒陨石标准化后的配

表3 碎屑岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄测定结果表

Tab. 3 LA-ICP-MS Zircon U-Pb dating results of clastic rocks

样品号及 分析点号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值				表面年龄 (Ma)			
					$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
TW1-09	5.78	50.66	60.85	0.832	0.539 9	0.007 3	0.070 7	0.000 4	438.4	4.8	440.2	2.6
TW1-04	23.99	127.21	291.93	0.436	0.542 4	0.007 6	0.069 3	0.000 4	440.0	5.0	432.1	2.5
TW1-08	26.15	172.32	277.63	0.621	0.543 1	0.008 1	0.070 6	0.000 4	440.5	5.4	439.9	2.6
TW1-25	121.07	105.37	197.39	0.534	0.545 2	0.006 4	0.071 2	0.000 5	441.8	4.2	443.3	3.1
TW1-23	140.93	248.02	287.74	0.862	0.545 4	0.007 2	0.069 7	0.000 4	442.0	4.7	434.3	2.6
TW1-26	322.28	212.26	584.01	0.363	0.550 8	0.007 3	0.072 1	0.000 5	445.5	4.8	449.0	2.7
TW1-10	6.96	37.97	109.50	0.347	0.553 8	0.007 9	0.071 3	0.000 5	447.5	5.2	444.1	3.1
TW1-17	7.45	62.06	47.51	1.306	0.554 4	0.011 8	0.072 0	0.000 5	447.9	7.7	448.4	3.2
TW1-13	16.53	68.51	86.69	0.790	0.555 0	0.007 2	0.071 9	0.000 5	448.3	4.7	447.6	3.0
TW1-12	10.16	62.20	109.69	0.567	0.557 8	0.013 5	0.071 9	0.000 6	450.1	8.8	447.3	3.7
TW1(2)-60	20.41	429.00	529.39	0.810	0.562 7	0.011 7	0.073 6	0.000 7	453.3	7.6	458.0	4.5
TW1-15	35.09	216.89	376.09	0.577	0.565 5	0.009 1	0.073 2	0.000 5	455.1	5.9	455.5	3.1
TW1-11	19.11	66.37	183.11	0.362	0.569 9	0.009 2	0.071 5	0.000 4	458.0	6.0	445.0	2.5
TW1-14	28.22	171.60	291.24	0.589	0.570 1	0.006 9	0.072 2	0.000 5	458.1	4.5	449.2	2.9
TW1(2)-59	103.27	1 127.29	1 152.01	0.979	0.576 7	0.013 8	0.073 6	0.000 6	462.3	8.9	457.8	3.6
TW1(2)-62	37.26	140.27	386.55	0.363	0.582 3	0.011 9	0.075 8	0.000 6	465.9	7.6	470.9	3.7
TW1-19	51.04	127.08	324.63	0.391	0.588 5	0.011 9	0.072 2	0.000 5	469.9	7.6	449.5	3.3
TW1-27	9.50	54.31	120.15	0.452	0.590 3	0.011 3	0.074 6	0.000 7	471.1	7.2	463.6	4.1
TW1(2)-64	204.80	286.52	1 271.52	0.225	0.590 3	0.016 2	0.077 2	0.000 8	471.1	10.4	479.3	4.6
TW1(2)-63	40.14	214.11	414.41	0.517	0.592 3	0.012 8	0.076 8	0.000 8	472.4	8.2	477.2	4.6
TW1-16	31.82	210.06	343.86	0.611	0.596 9	0.012 7	0.078 0	0.000 7	475.3	8.1	484.1	4.0
TW1(2)-61	25.75	134.20	257.13	0.522	0.597 8	0.022 0	0.074 1	0.000 9	475.8	14.0	460.9	5.2
TW1(2)-67	28.81	144.50	288.26	0.501	0.601 4	0.012 9	0.079 8	0.000 7	478.1	8.2	495.0	4.2
TW1(1)-53	47.13	338.28	477.28	0.709	0.604 1	0.020 5	0.069 7	0.000 8	479.8	13.0	434.4	4.9
TW1-44	33.70	304.87	362.69	0.841	0.614 6	0.011 5	0.080 7	0.000 8	486.4	7.2	500.3	4.7
TW1-42	17.65	152.77	194.23	0.787	0.615 2	0.016 8	0.080 0	0.000 9	486.8	10.6	496.2	5.1
TW1-24	36.08	221.50	354.59	0.625	0.617 5	0.011 6	0.071 2	0.000 9	488.3	7.3	443.2	5.3
TW1(2)-66	54.41	262.32	559.11	0.469	0.617 8	0.013 5	0.079 3	0.000 7	488.4	8.5	492.2	4.4
TW1-18	29.71	196.02	342.73	0.572	0.621 9	0.012 4	0.079 3	0.000 7	491.1	7.8	492.1	4.3
TW1-41	111.79	38.61	262.06	0.147	0.624 9	0.011 6	0.079 1	0.000 7	492.9	7.2	490.9	4.3
TW1-48	39.60	438.68	406.49	1.079	0.629 4	0.009 8	0.081 2	0.000 8	495.7	6.1	503.3	4.6
TW1-40	8.38	57.22	92.25	0.620	0.629 8	0.010 3	0.077 6	0.000 6	496.0	6.4	481.6	3.5
TW1-49	55.70	375.96	671.62	0.560	0.631 6	0.012 3	0.081 6	0.000 7	497.1	7.6	505.9	4.2
TW1(2)-65	44.40	221.13	317.05	0.697	0.632 0	0.010 9	0.077 9	0.000 8	497.3	6.8	483.6	5.0
TW1-47	44.33	435.02	497.84	0.874	0.633 1	0.019 0	0.081 1	0.001 0	498.0	11.8	502.4	5.9
TW1-45	51.37	175.51	620.56	0.283	0.633 8	0.012 0	0.080 7	0.000 8	498.5	7.5	500.6	4.5
TW1-30	30.67	198.82	370.04	0.537	0.657 3	0.011 0	0.083 5	0.000 8	512.9	6.8	517.0	4.9
TW1-28	7.01	15.65	16.23	0.965	0.661 2	0.012 5	0.083 0	0.000 7	515.3	7.7	514.1	4.3
TW1-32	38.54	176.81	465.35	0.380	0.661 7	0.014 7	0.083 8	0.000 8	515.6	9.0	518.5	5.0
TW1-31	67.79	592.44	715.47	0.828	0.662 2	0.022 6	0.083 5	0.000 9	515.9	13.8	517.2	5.6

续表 3

样品号及 分析点号	Pb	Th	U	Th/U	同位素比值				表面年龄 (Ma)			
					²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ
TW1(2)-68	13.87	170.39	77.00	2.213	0.662 5	0.015 4	0.085 9	0.000 7	516.1	9.4	531.0	4.1
TW1-43	89.88	547.82	1 046.16	0.524	0.667 5	0.011 9	0.080 6	0.000 7	519.2	7.2	499.7	4.1
TW1-20	18.83	134.78	193.41	0.697	0.671 3	0.012 9	0.064 8	0.000 9	521.5	7.8	404.8	5.2
TW1-29	93.17	434.87	569.39	0.764	0.683 2	0.018 0	0.083 0	0.000 8	528.7	10.9	514.2	4.8
TW1-46	55.44	593.22	643.82	0.921	0.698 4	0.011 9	0.081 0	0.000 8	537.8	7.1	502.0	4.6
TW1(2)-69	83.99	504.00	813.35	0.620	0.707 3	0.018 9	0.088 9	0.001 0	543.1	11.2	548.8	6.1
TW1(1)-50	16.03	107.39	176.20	0.609	0.721 4	0.014 9	0.079 8	0.000 8	551.5	8.8	494.6	4.9
TW1-33	46.35	82.49	130.08	0.634	0.724 3	0.015 3	0.088 7	0.000 9	553.2	9.0	547.8	5.6
TW1-34	34.01	238.46	376.36	0.634	0.773 4	0.016 6	0.094 3	0.001 1	581.7	9.5	581.2	6.3
TW1-36	193.41	293.75	998.84	0.294	0.867 4	0.034 5	0.107 3	0.001 4	634.2	18.7	657.0	8.1
TW1-35	341.75	170.93	764.53	0.224	0.886 6	0.018 1	0.103 2	0.000 9	644.5	9.7	633.3	5.5
TW1(2)-71	39.88	253.59	444.57	0.570	0.953 7	0.031 0	0.112 3	0.002 0	680.0	16.1	686.1	11.3
TW1-37	13.91	98.38	165.51	0.594	1.196 0	0.018 9	0.132 5	0.001 3	798.8	8.8	801.9	7.2
TW1(2)-72	15.01	59.18	153.53	0.385	1.203 5	0.021 6	0.133 3	0.001 5	802.2	10.0	806.5	8.4
TW1-38	29.72	177.42	307.69	0.577	1.285 7	0.016 9	0.139 9	0.001 0	839.4	7.5	844.2	5.7
TW1(2)-73	85.35	468.84	869.61	0.539	1.370 2	0.042 7	0.150 0	0.001 7	876.3	18.3	900.8	9.8
TW1(1)-51	15.60	81.26	181.48	0.448	1.711 0	0.049 6	0.145 3	0.003 2	1 012.7	18.6	874.3	18.0
TW1(2)-74	86.03	414.22	487.41	0.850	1.787 8	0.023 9	0.174 0	0.001 7	1 041.0	8.7	1 034.2	9.6
TW1-39	34.28	207.02	389.86	0.531	2.323 7	0.035 9	0.201 7	0.002 4	1 219.6	11.0	1 184.3	13.0
TW1(2)-75	64.56	344.62	645.80	0.534	3.788 6	0.045 9	0.281 8	0.002 1	1 590.3	9.8	1 600.3	10.8
TW1(2)-76	22.73	106.76	239.78	0.445	4.427 9	0.090 3	0.309 4	0.003 8	1 717.6	16.9	1 737.7	18.5
TW1(2)-77	47.54	278.03	472.73	0.588	6.007 0	0.075 9	0.365 9	0.003 0	1 976.9	11.1	2 010.0	14.4
TW1(2)-78	90.46	476.32	749.47	0.636	6.100 2	0.063 6	0.373 4	0.002 4	1 990.3	9.2	2 045.6	11.2
TW1(1)-52	34.65	208.34	363.47	0.573	7.018 8	0.063 1	0.350 0	0.002 2	2 113.8	8.1	1 934.8	10.5
TW1(2)-79	54.82	354.98	551.92	0.643	9.741 5	0.100 7	0.434 2	0.003 1	2 410.6	9.7	2 324.7	13.8
TW1(2)-80	32.97	153.56	396.19	0.388	10.225 6	0.129 3	0.467 6	0.003 9	2 455.4	11.8	2 473.0	17.4

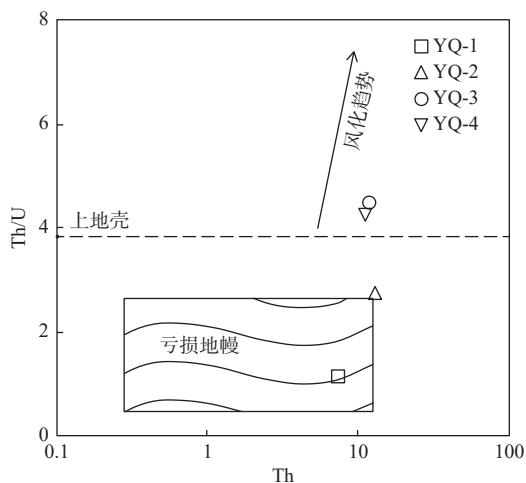


图 4 样品 Th/U-Th 图解(据 McLennan et al., 1993)

Fig. 4 Th/U-Th discrimination diagram

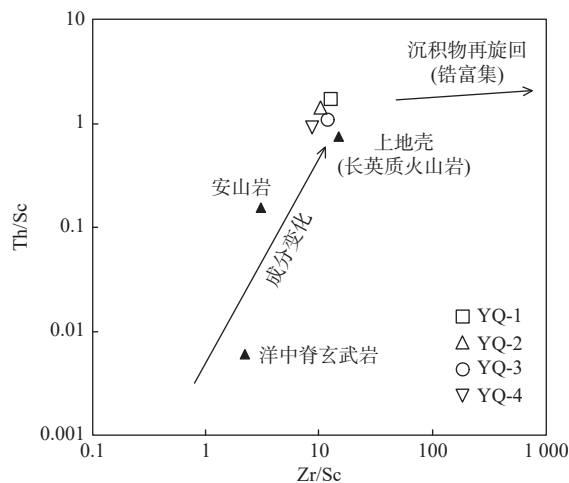


图 5 样品 Zr/Sc-Th/Sc 图解(据 McLennan et al., 1993)

Fig. 5 Zr/Sc-Th/Sc discrimination diagram

分型式(图6)显示,迭部组 ΣREE 为 $112.93 \times 10^{-6} \sim 264.91 \times 10^{-6}$,平均为 215.82×10^{-6} ; $(\text{La}/\text{Yb})_N$ 值为 $9.70 \sim 11.81$, $(\text{La}/\text{Sm})_N$ 值为 $4.35 \sim 5.71$, $(\text{Gd}/\text{Yb})_N$ 值为 $1.51 \sim 1.77$ 。迭部组浅变质碎屑岩具有轻稀土明显富集,重稀土亏损的特征,且Eu负异常明显,指示迭部组碎屑岩的源岩为富硅的长英质岩石,如上地壳的酸性岩或沉积岩。

La/Th-Hf判别图解可以判别迭部组浅变质碎屑岩的构造环境沉积物物源(董顺利, 2013), 4个样品La/Th-Hf投点均位于长英质物源区或其周围(图7a), 与稀土元素结果较一致。在Co/Th-La/Sc图解中, 样品投点主要位于长英质岩浆岩区(图7b)。

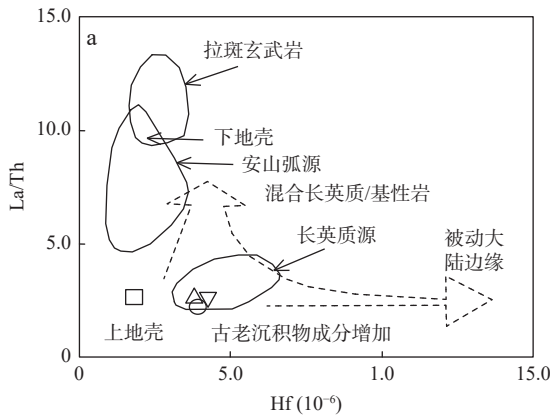


图7 样品La/Th-Hf(a)(据Floyd et al., 1987)和Co/Th-La/Sc(b)(据Bhatia, 1983)源岩属性判别图解

Fig. 7 (a) LA/Th-Hf and (b) Co/Th-La/Sc discrimination diagrams of source rocks

综上所述,迭部组浅变质碎屑岩成分来自上地壳长英质岩浆岩。

3.1.3 构造环境

风化作用、变质作用和成岩作用等因素一般会导致浅变质碎屑岩化学组分的变化,但其微量元素的地球化学标准仍然被广泛有效用来判别沉积构造环境(Sun et al., 1989; 董顺利, 2013)。迭部组浅变质碎屑岩微量元素分析结果(表2)显示,它们在微量元素蛛网图呈规律性变化, Ba、U、Th等大离子亲石元素(LILE)相对富集,高场强元素(HFSE)Sr、Nb相对亏损,曲线分布特征与大陆上地壳的微量元素蛛网相似(图8)。微量元素在沉积过程中变化较弱,其活泼性较低,而沉积物微量元素的含量主要取决于源岩和风化作用,其对于判别沉积盆地构造环境有很好的指示作用(McLennan et al., 1993)。在Ti/Zr-La/Sc构造环境判别图解(图9)中,样品主要

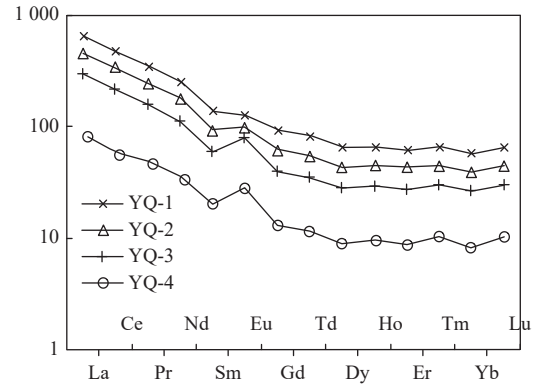
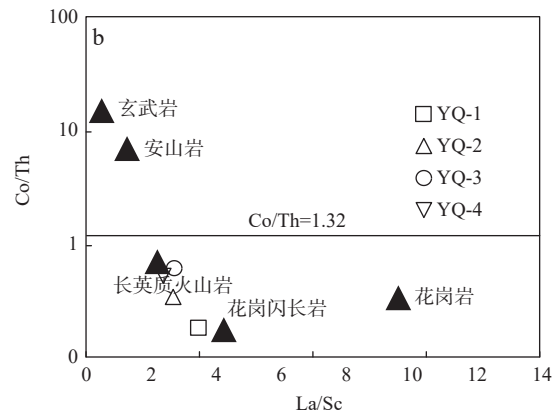


图6 样品稀土元素球粒陨石标准化配分图(据Boynton, 1984)

Fig. 6 Rare earth element pattern distribution diagram



落入或靠近活动大陆边缘区域;在La-Th-Sc图解中,样品落入大陆岛弧、活动大陆边缘与被动大陆边缘区域(图10a);在Th-Sc-Zr/10图解中,样品落入活动大陆边缘及其附近区域(图10b);在Th-Co-Zr/10图解中,样品落入活动大陆边缘及其附近区域(图10c),综合判断迭部组主要呈现出活动大陆边缘型物源区的特征。

上述分析表明,迭部组浅变质碎屑岩显示上地壳长英质火山岩的物源特征,源区应以活动大陆边缘背景下构造环境为主。

3.2 碎屑锆石U-Pb年代学

TW-1样品中大部分锆石颗粒呈浅粉色,晶形以半自形柱状、粒状为主,次圆粒状次之,自形晶少量,表面多呈粗糙状,个别可见裂纹,显示后期有受力迹象,大小为 $0.03 \sim 0.12 \text{ mm}$,延长系数为 $1.2 \sim 3$,锆石分选性好,磨圆度一般。前人研究认为岩浆成因锆石

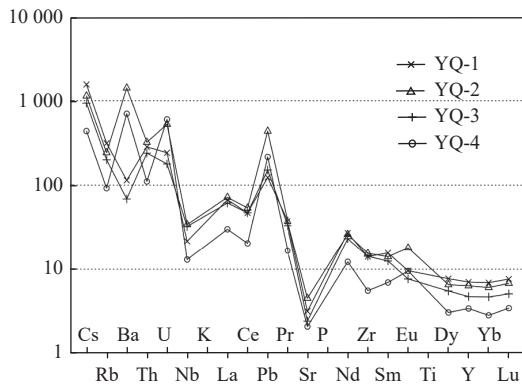


图 8 样品微量元素原始地幔标准化蛛网图
(据 Sun et al., 1989)

Fig. 8 Spider diagram of trace elements in clastic rocks of Diebu Formation

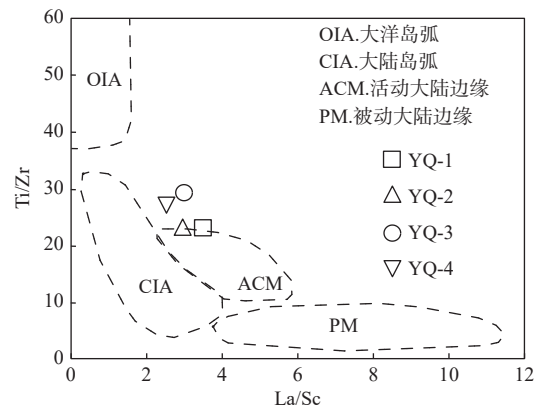
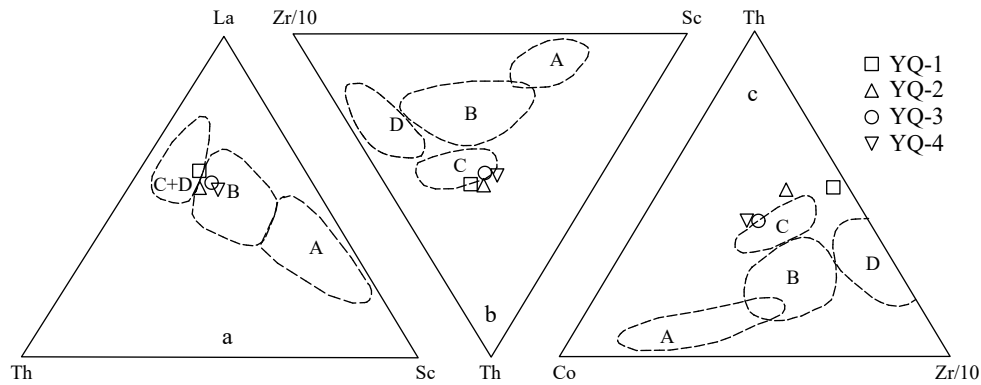


图 9 样品 Ti/Zr-La/Sc 构造环境判别图解
(据 Bhatia, 1983)

Fig. 9 Ti/Zr-La/Sc discrimination diagram of tectonic environment



a. La-Th-Sc 图解; b. Th-Co-Zr/10 图解; c. Th-Co-Zr/10 图解; 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 10 构造环境判别图解(据 Bhatia, 1983)

Fig. 10 Discrimination diagram of tectonic environment

Th/U 值一般大于 0.4, 变质成因锆石 Th/U 值小于 0.1(Hoskin, 2002), 文中所测的 65 颗有效碎屑锆石的 Th/U 值为 0.14~2.213, 53 颗锆石 Th/U 值大于 0.4, 无小于 0.1 的锆石, 显示以岩浆成因为主(表 3), CL 图像亦显示该区间大多数的锆石具典型的岩浆锆石震荡环带特征(图 3)。

65 个有效碎屑锆石 U-Pb 年龄中(表 3), 61 个不谐和度小于或等于 5%(占 93%), 其谐和曲线见图 11。从年龄谱图上看(图 12), U-Pb 有效年龄主要集中在 440~680 Ma、798~876 Ma、1 012~1 291 Ma、1 590~1 990 Ma 和 2 113~2 455 Ma 等 5 个峰值。其中, 440~680 Ma 峰值共有 51 个碎屑锆石年龄, 占该样品总有效数据的 76.9%, 其算术平均值为 488 Ma, 相对概率峰值为 498 Ma, 该区间年龄数据的不

谐和度为-5%~10%, 平均为 3%, 因此是主要的和可信的年龄区间之一, 可细分为 438.4~553.2 Ma 和 581.7~680 Ma 两个亚组, 相对概率峰值年龄分别为 498 Ma 和 644 Ma。798~876 Ma 峰值共有 4 个碎屑锆石年龄, 占该样品总有效数据的 6.1%, 其算术平均值为 829 Ma, 相对概率峰值为 802 Ma。1 012~1 291 Ma 峰值共有 3 个碎屑锆石年龄, 占该样品总有效数据的 3.1%, 算术平均值为 1 130 Ma, 相对概率峰值为 1 012 Ma。1 590~1 990 Ma 峰值共有 4 个碎屑锆石年龄, 占该样品总有效数据的 6.1%, 其算术平均值为 1 818 Ma, 相对概率峰值为 1 976 Ma。2 113~2 455 Ma 峰值共有 3 个碎屑锆石年龄, 占该样品总有效数据的 4.6%, 算术平均值为 2 326 Ma, 相对概率峰值为 2 324 Ma。

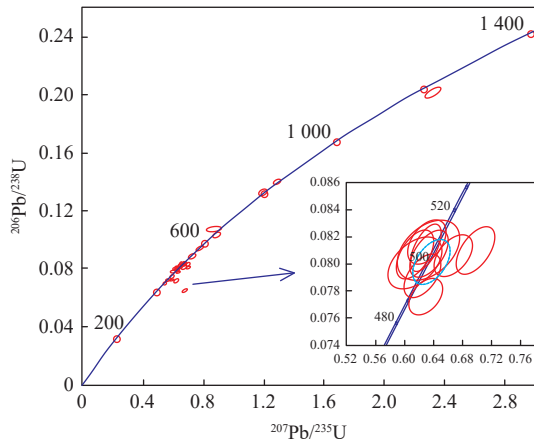


图 11 锆石 U-Pb 谐和曲线图

Fig. 11 U-Pb harmonic curve of zircon

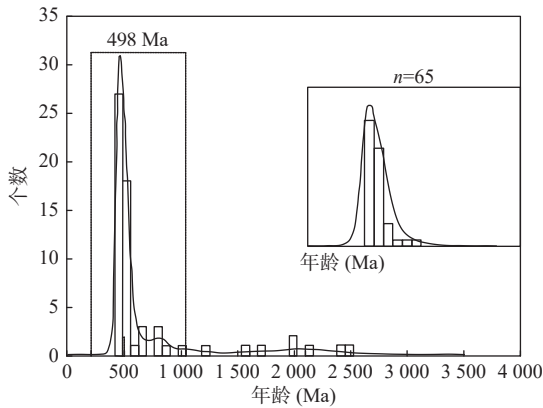


图 12 锆石 U-Pb 年龄谱图

Fig. 12 Zircon U-Pb age spectrum

4 讨论

4.1 迭部组时代的限定

迭部组浅变质碎屑岩地处西秦岭造山带白龙江地区,前人在迭部县尖泥沟一带黑色碳质千枚岩中发现了大量笔石类化石(甘肃省地矿局,1999),其中 *Ok-tavites spiralis*, *Monograptus cf. probosciformis* 均为中国下志留统标准分子,指示迭部组时代为早志留世,相当于早志留世晚凡伦期。

笔者在迭部组中获得碎屑锆石最小年龄为 440 Ma、最大年龄为 2455 Ma,限定了迭部组原岩沉积时代的上限年龄,即其沉积时代不早于 440 Ma(不早于早志留世),支持将迭部组时代定为早志留世。

4.2 碎屑锆石年龄谱

迭部组浅变质碎屑岩的样品共 65 颗碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年代学信息显示,锆石年龄主要集

中在 5 个组(图 11、图 12),结合区域地质资料及前人研究成果,其与区域构造岩浆热事件存在较好的对应关系。

第一组年龄为 440~680 Ma,为主要年龄分布区,峰值年龄为 498 Ma,年龄相对集中,且呈现最强烈峰值特征,该组年龄基本为岩浆锆石谐和年龄,代表与早古生代加里东期构造运动有关的岩浆活动事件的年龄谱,与 Gondwana 大陆汇聚(650~500 Ma)时期大致相当。可细分为 438.4~553.2 Ma 和 581.7~680 Ma 两个亚组。438.4~553.2 Ma 亚组在西秦岭北缘构造带发育的一系列加里东期岩浆活动,如天水关子镇蛇绿混杂岩中变辉长(534±9 Ma)和变斜长花岗岩(517±8 Ma)、武山蛇绿混杂岩中变辉长岩(440±5 Ma)和鸳鸯镇变辉长闪长岩(456±3 Ma,李王晔,2008)、关子镇蛇绿混杂岩中的变辉长岩(499.7±1.8 Ma)(裴先治等,2007);在北祁连造山带东段加里东期岩浆活动同样频繁,如阎家店闪长岩体(440.2±0.92 Ma)(魏方辉等,2012)、黄门川花岗岩体(442.8±2.1 Ma)(魏方辉等,2012)、张家川南寒武纪石英闪长岩体(547.7±68.8 Ma)等与该时限均接近。581.7~680 Ma 亚组区域上南秦岭地区随枣盆地中发育较多的该时限基性-超基性岩浆活动,如南秦岭周庵超镁铁质岩体(637 Ma)(王梦玺等,2012)、寿山岩体(636±11 Ma)(洪吉安等,2009)、独崇山岩体(632±6 Ma)(薛怀民等,2011)和巴山岩体(631±11 Ma)(洪吉安等,2009),耀岭河群中变流纹质火山熔岩和晶屑岩屑凝灰质火山碎屑岩层中锆石的 U/Pb 年龄为(685±5) Ma(凌文黎等,2007)。

第二组年龄为 798~876 Ma,年龄峰值为 802 Ma,该组年龄代表了新元古代晚期构造岩浆活动时间,与 Rodinia 超大陆裂解时间(860~740 Ma)大致相当(李王晔,2008)。区域上与祁连造山带东端榆中县兴隆山群中火山岩(824~713 Ma)(王清海等,2011)、五峰村花岗岩体(846±2 Ma)(雍拥等,2008);北秦岭新阳-元龙花岗质片麻岩后期花岗岩浆事件(827~861 Ma)(刘会彬等,2006);南秦岭耀岭河群基性火山岩(808±6 Ma)(李怀坤等,2003)、南秦岭武当群火山岩(802±13 Ma)(刘仁燕等,2020);碧口地体坪头山闪长岩体(855±6 Ma)、关口垭闪长岩体(884±14 Ma)、白雀寺杂岩体(855±6 Ma)、铜厂闪长岩体(821±7 Ma)、二里坝花岗闪长岩体(823±7 Ma)、康县地区基性火山岩(841±19~812±11 Ma)(闫全人等,2007)、略阳郭镇

地区铈厂沟金矿变玄武岩和变英安岩(802±5 Ma)(林振文等, 2013)、张儿沟埃达克质岩(840±5 Ma)(徐通, 2016); 扬子地块北缘西乡群孙家河组流纹岩(832.9±4.9 Ma)和辉石玄武岩(845.0±17 Ma)(徐学义等, 2009)、西乡群大石沟组(789.0±4.4 Ma)等岩浆岩结晶年龄相近。

第三组年龄 1 012~1 291 Ma, 峰值年龄为 1 012 Ma, Grenvillian 造山运动(900~1 300 Ma)与本次碎屑锆石限定的 1 012~1 291 Ma 年龄区间年代基本吻合, 该组年龄代表中元古代早期构造岩浆活动时间。区域上与北祁连东段马衔山地区中元古代花岗岩(1 192±38 Ma)(王洪亮等, 2011)、兴隆山地区玄武岩(1 032~1 172 Ma)(徐学义等, 2009); 扬子地块北缘黄陵背斜庙湾蛇绿混杂岩中的变辉长岩(1 118~1 096 Ma)(蒋幸福等, 2014)、扬子地块西缘桃树湾辉长岩(1 375±7 Ma)(任光明等, 2017)等岩浆岩结晶年龄大致相当。

第四组年龄 1 590~1 990 Ma, 峰值年龄为 1 976 Ma, 该组年龄代表中元古代晚期—古元古代早期构造岩浆活动时间, 与 Columbia 超大陆汇聚—裂解时间(2 100~1 700 Ma)(Rogers et al., 2002)大致相当。前人研究显示, 扬子地块西缘~1.40 Ga 从 Columbia 超大陆裂解成洋(刘伟, 2019)、华北地区碱性岩岩浆事件(1 635~1 625 Ma)与 Columbia 超大陆裂解有关(张健等, 2015), 指示该时限的锆石年龄为 Columbia 超大陆汇聚、裂解在区域上的响应。区域上华北地块南缘、北祁连东段、秦岭地块均分布有这一时期的岩浆活动, 如华北地块南缘的熊耳群火山岩(1.80~1.75 Ga)(赵太平等, 2004)、华北地块西南缘鲁山太华杂岩斜长角闪岩原岩为早元古代侵入的碱性玄武岩(1 932±48 Ma)(林慈奎, 2006)、华北地块铁岭组钾质斑脱岩(1 437±21 Ma)(苏文博等, 2010); 祁连东段张家川新元古代复式深成杂岩体(1 450 Ma)、长宁驿花岗质片麻岩(1 765±57 Ma)(王银川等, 2012); 太白岩基中巩坚沟变形侵入体和宝鸡岩基胡店变形侵入体(1 741±12 Ma、1 770±13 Ma)(王洪亮等, 2011)等岩浆岩结晶年龄接近, 具有一定的亲缘性。

第五组年龄 2 113~2 455 Ma, 峰值年龄为 2 324 Ma, 该组年龄代表古元古代早期—新太古代晚期构造热事件, 与全球性地壳增生事件的时间(峰期 2 500 Ma)(胡建等, 2007)接近, 代表古老变质结晶基底年龄。区域上与北祁连造山带陇山岩群正片麻岩结晶基底

(1 900 Ma、2 300 Ma、2 500 Ma)(何艳红等, 2005); 南秦岭略阳新太古代鱼洞子岩群花岗片麻岩(2 661±17~2 703±26 Ma)(张欣等, 2010)、南秦岭陡岭杂岩主体的条带状闪长质—花岗质片麻岩(原岩侵位年龄为 2 469±22 Ma、2 479±12 Ma、2 501±17 Ma 和 2 509±14 Ma)(胡娟等, 2013); 北秦岭古元古代秦岭岩群(1.0~0.95 Ga)(罗芬红, 2019)、北秦岭中新元古代带宽坪岩群片麻状花岗岩(结晶年龄为 1 806±18 Ma)(高盛等, 2015); 碧口地体鱼洞子岩群中的 TTG 质片麻岩套(2.7~2.45 Ga)(刘宝星, 2020)、鱼洞子岩群中磁铁石英岩(2 645 Ma); 华北地块南缘北沟岩体(2 569~2 530 Ma)(郭荣鑫, 2018)、华北地块南缘新太古代安沟杂岩(2.54~2.51 Ga)(黄波, 2020)等古老变质基底年龄接近, 具有较好的亲缘性。

综上所述, 研究区所属的南秦岭微地块及其周缘微地块均有相近的岩浆事件。本次采取的碎屑锆石整体磨圆一般、部分锆石晶形较为完整, 指示沉积物搬运距离有限, 且 Zr/Sc 和 Th/Sc 值同样指示沉积区距源区一般较近, 说明距离研究区较近的南秦岭微地块、北秦岭微地块、扬子地块北缘、北祁连东段提供物源的可能性明显大于华北地块南缘。

4.3 物源分析

前人研究表明, 南北秦岭之间的“天水—武山洋”初始消减时限为早寒武世, 期间发育大量岛弧型中基性杂岩和洋内岛弧火山岩, 早中奥陶世后撤扩展形成二郎坪弧后盆地, 后大约于 400 Ma 闭合(李王晔, 2008); 北秦岭地区早古生代发生的“商丹洋”俯冲碰撞造山伴随大量的俯冲碰撞花岗岩、双峰式火山岩等岩浆热事件, 其俯冲碰撞时限为奥陶纪, 志留纪已进入碰撞造山阶段(徐通, 2016); 奥陶纪发生以北秦岭关子镇蛇绿岩为代表的古洋盆扩张, 并伴有洋壳俯冲作用、产生火山岩岩浆岛弧(裴先治等, 2007); 北秦岭秦岭岩群黑云斜长片麻岩中侵入的长英质脉体形成于(442±9)Ma, 为商丹洋向北俯冲引起的构造热事件(兰瑞烜等, 2020)。因而, 南北秦岭微地块之间的“商—丹”洋闭合时限应不晚于 440 Ma, 早古生代是北秦岭重要的岩浆—变质作用时期。北秦岭与华北地块之间在新元古代时属于统一构造背景, 广泛发育新元古代岩浆活动(凌文黎等, 2007; 祝禧艳等, 2008), 二者在新元古代之后对接拼合(丁振举等, 2018); 对北秦岭与华北地块之间的宽坪岩群的相关研究认为, 早志留世(~440 Ma)二郎坪陆源盆地与宽坪陆源盆地的闭

合导致华北地块与北秦岭微地块拼接完成(王海杰等, 2020)。北秦岭微地块和北祁连东段结合部位被以新阳-元龙大型韧性走滑剪切构造带分割(丁仁平等, 2009), 二者物质差异较大。研究发现, 北秦岭木其滩斜长角闪岩为早古生代(锆石 U-Pb 年龄为 488.9 ± 4.4 Ma)“商丹洋”西延洋壳俯冲的结果, 北祁连造山带东段红土堡组变基性岩微量元素比率指示其为弧后盆地的构造背景, 北秦岭微地块与北祁连造山带具有早古生代西秦岭北缘俯冲的特征, 可能经历了相似的构造演化(尚渊甲, 2021); 北祁连造山带与北秦岭微地块结合部位发育的俯冲型花岗岩(471~440 Ma), 指示二者早古生代发生拼接(魏方辉等, 2012); 中元古代早期北祁连东段属于华北地块的一部分, 二者构造岩浆热事件同步, 表现为相同的结晶基底和构造属性, 该期构造热事件可能与 Columbia 超大陆在区内响应有关(王银川等, 2012)。北秦岭微地块与扬子地块之间的勉略洋盆于新元古代早中期(~800 Ma)闭合, 其双向俯冲于北秦岭微地块和碧口微地块之下, 与 Rodinia 超大陆裂解事件在区域上的响应有关(李亦飞等, 2018)。随后, 南秦岭微地块、勉略缝合带、扬子地块西北缘(碧口微地块)进入后碰撞-裂解进程, 志留纪形成勉略裂陷槽接受稳定沉积(徐通, 2016)。综上所述, 南秦岭微地块及其周缘板块经历了复杂的构造岩浆热事件, 在早志留世(440 Ma)南秦岭微地块与华北地块、北祁连东段、北秦岭微地块、扬子地块(碧口微地块)都以不同方式、不分先后、不同程度的拼接在了一起。据此认为北秦岭微地块、祁连造山带、华北地块南缘、扬子地块北缘, 其与南秦岭微地块自身都存在为选部组提供物源的可能性。

根据前人研究成果和文中对研究区及其周缘可能物源区的区域性岩浆事件统计结果显示(图 13), 研究区 440~680 Ma 时限的年龄谱图与北秦岭微地块吻合度极高, 其次与南秦岭、扬子北缘有一定的吻合度, 显示北秦岭微地块为选部组浅变质碎屑岩提供了主要的物源, 与前人研究认为北秦岭微地块广泛发育古生代岩浆作用(李亦飞等, 2018)对应, 其次为南秦岭微地块、扬子地块北缘、北祁连东段; 798~876 Ma 时限的年龄谱图与南秦岭微地块、扬子北缘吻合度高, 该时限碎屑锆石提供了主要物源, 其次为北秦岭微地块; 1 012~1 291 Ma 时限的年龄谱图显示, 该时限的主要碎屑锆石来源于北秦岭微地块, 北祁连东段可能参与部分物源供给; 1 590~1 990 Ma 时限的碎屑锆石

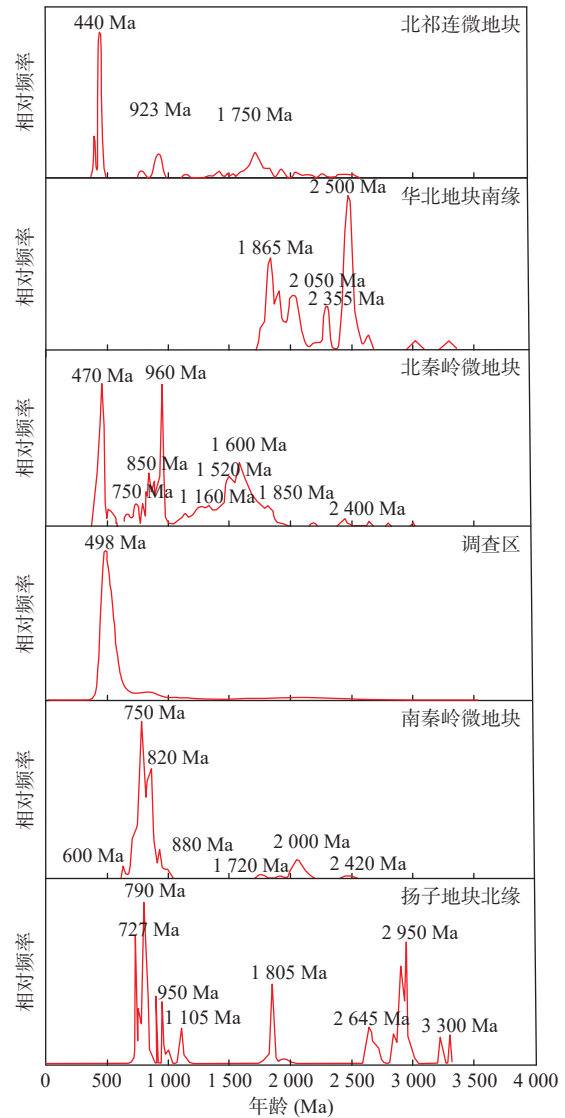


图 13 研究区及其邻区碎屑锆石 U-Pb 年龄累计频谱图 (据罗芬红, 2019; 任龙, 2019; 寇琳琳等, 2022)

Fig. 13 Cumulative U-Pb age spectrum of detrital zircon in the study area and its adjacent areas

主要北秦岭微地块提供, 华北地块南缘虽有该时限的结晶年龄, 但提供物源的可能性不大; 2 113~2 455 Ma 时限的碎屑锆石与华北地块南缘的岩浆事件具有一定的对应性, 其可能来源于华北地块南缘, 但因碎屑锆石的磨圆特征且该时限数量较少不具代表性, 不排除南、北秦岭微地块中的老地层参与供给但抬升被剥蚀已经不再保存或被后期构造掩盖的可能性。

自早古生代以来, 受“商丹洋”闭合影响, 海域面积大幅度减少, 甘肃境内南秦岭地区志留世接受广泛的物源沉积, 而北秦岭地区基本未见志留世沉积, 指示“商丹洋”闭合过程中北秦岭微地块抬升、遭受

剥蚀, 南秦岭微地块的抬升明显低于北秦岭, 为区内迭部组接受物源沉积提供有利的地形条件。同时, 岩石化学判别显示迭部组碎屑岩源区形成以活动大陆边缘背景下构造环境为主, 印证了区内沉积物源主要来源于北秦岭的可能性。综上所述, 北秦岭作为源区为其南侧志留系迭部组提供主要的沉积物质, 南秦岭微地块、扬子地块提供部分沉积物源, 北祁连东段可能参与物源供给。

5 结论

(1) 迭部组碎屑组分大多没有经历再旋回, 沉积区距源区不远; 母岩为沉积岩或上地壳酸性岩, 源区形成于活动大陆边缘背景下构造环境特征。

(2) 迭部组沉积的浅变质碎屑岩碎屑锆石 U-Pb 最小年龄为 440 Ma, 代表了其沉积下限, 其与区域笔石类化石定年结论相同, 指示迭部组时代为早志留世。

(3) 迭部组沉积的物源年龄构成主要有 440~680 Ma、798~876 Ma、1 012~1 291 Ma、1 590~1 990 Ma、2 113~2 455 Ma 等 5 个年龄组, 显示区内物源类型的复杂性。总体来看, 迭部组沉积物源主要来自北秦岭微地块, 少量来自于南秦岭微地块、扬子地块, 祁连东段可能参与部分物源供给。

参考文献(References):

- 敖文昊, 张宇昆, 张瑞英, 等. 新元古代扬子北缘地壳增生事件: 来自汉南祖师店奥长花岗岩地球化学、锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据 [J]. 地质论评, 2014, 60(6): 1393-1408.
- AO Wenhao, ZHANG Yukun, ZHANG Ruiying, et al. Neoproterozoic crustal accretion of the northern margin of Yangtze plate: constrains from geochemical characteristics, LA-ICP-MS zircon U-Pb chronology and Hf isotopic compositions of trondhjemite from Zushidian area, Henan region [J]. Geological Review, 2014, 60(6): 1393-1408.
- 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 Saping, PEI Xianzhi, LI Yong, et al. Biotite ⁴⁰Ar-³⁹Ar ages of granitic mylonite at 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.
- 丁振举, 文成雄, 国阿千, 等. 西秦岭吴家山群地层时代及物源特征: 来自碎屑锆石 U-Pb 年龄证据 [J]. 地球科学与环境学报, 2018, 40(3): 111-132.
- DING Zhenju, WEN Chengxiong, GUO Aqian, et al. Stratigraphic age and provenance characteristics of Wujiashan group in west Qinling, China: evidences from detrital zircon U-Pb age [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2018, 40(3): 111-132.
- 董顺利. 塔里木盆地环满加尔地区早古生代中晚期沉积物源体系及构造-古地理格局 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2013, 1-193.
- DONG Shunli. The middle-late Early Paleozoic sedimentary provenance systems and tectonic-paleogeographic framework in circum-Mangar area, Tarim basin [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 1-193.
- 甘肃省地矿局. 甘肃省岩石地层 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-314.
- Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Lithostratigraphy of Gansu Province [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1997: 1-314.
- 甘肃省地矿局. 尖尼幅 (I48E012007) 区域地质图说明书 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 1-45.
- Gansu Provincial Bureau of Geology and Mineral Resources. Description of regional geological map of Jianni sheet [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 1-45.
- 高盛, 陈丹玲, 宫相宽, 等. 天水东盆地区宽坪岩群碎屑岩和花岗岩中的锆石 U-Pb 定年及其地质意义 [J]. 地学前缘, 2015, 22(4): 255-264.
- GAO Sheng, CHEN Danling, GONG Xiangkuan, et al. Zircon U-Pb dating of clastic rocks and granites of Kuanping group in Dongcha areas of Tianshui, and its geological implications [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 22(4): 255-264.
- 郭荣鑫. 嵩山地区新太古代北沟岩体地球化学特征及其地质意义 [D]. 焦作: 河南理工大学, 2018: 1-51.
- GUO Rongxin. Geochemical characteristics of neoproterozoic Beigou pluton and its geological implications in Songshan area [D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2018: 1-51.
- 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, 2005, 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.
- 洪吉安, 段苏浩. 扬子北缘新元古代岩浆活动架构 [J]. 矿物岩石地球化学通报, 2009, 28: 66.

- HONG Jian, DUAN Suhao. Framework of Neoproterozoic magmatism in the northern margin of the Yangtze river[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2009, 28: 66.
- 胡建, 邱检生, 王汝成, 等. 新元古代 Rodinia 超大陆裂解事件在扬子北东缘的最初响应: 东海片麻状碱性花岗岩的锆石 U-Pb 年代学及 Nd 同位素制约[J]. *岩石学报*, 2007, 23(6): 1321-1333.
- HU Jian, QIU Jiansheng, WANG Rucheng, et al. Earliest response of the neoproterozoic Rodinia break-up in the northeastern Yangtze craton: constraints from zircon U-Pb geochronology and Nd isotopes of the gneissic alkaline granites in Donghai area[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2007, 23(6): 1321-1333.
- 胡娟, 刘晓春, 陈龙耀, 等. 扬子克拉通北缘约 2.5Ga 岩浆事件: 来自南秦岭陡岭杂岩锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. *科学通报*, 2013, 58(34): 3579-3588.
- HU Juan, LIU Xiaochun, CHEN Longyao, et al. A~2.5Ga magmatic event at the northern margin of the Yangtze craton: evidence from U-Pb dating and Hf isotope analysis of zircons from the Douling complex in the South Qinling orogen[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(34): 3579-3588.
- 黄波. 华北克拉通南缘新太古代增生碰撞造山作用及其地球动力学启示[D]. 武汉: 中国地质大学, 2020: 1-131.
- HUANG Bo. Neoproterozoic accretionary-to-collisional orogenesis in the southern North China craton and its geodynamic implications [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2020: 1-131.
- 蒋幸福. 扬子克拉通黄陵背斜庙湾蛇绿杂岩程英及大地构造意义[D]. 武汉: 中国地质大学, 2014: 1-94.
- JIANG Xingfu. Genesis and tectonic significance of the Miaowan ophiolite complex in the Huangling anticline, Yangtze craton[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2014: 1-94.
- 姜寒冰, 杨合群, 赵国斌, 等. 西秦岭成矿带区域成矿规律概论[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 187-202.
- JIANG Hanbing, YANG Hequn, ZHAO Guobin, et al. Discussion on the Metallogenic Regularity in West Qinling Metallogenic Belt, China[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 187-202.
- 寇琳琳, 李海龙, 李振宏, 等. 青藏高原东北缘烟山构造带二叠系红泉组沉积时代及物源示踪[J]. *地质通报*, 2022, 41(2-3): 315-326.
- KOU Linlin, LI Hailong, LI Zhenhong, et al. Sedimentary age and provenance tracing of the Permian Hongquan formation in the Yantongshan structural belt on the northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(2-3): 315-326.
- 兰瑞焯, 李加好, 杨挺宇. 秦岭岩群早古生代晚期构造热事件及地质意义[J]. *合肥工业大学学报*, 2020, 43(11): 1550-1555.
- LAN Ruixuan, LI Jiahao, YANG Tingyu. Alate early Paleozoic tectono thermal event of the Qinling group and its geological significance[J]. *Journal of Hefei University of Technology (Natural Science)*, 2020, 43(11): 1550-1555.
- 李怀坤, 陆松年, 陈志宏, 等. 南秦岭耀岭河群裂谷型火山岩锆石 U-Pb 年代学[J]. *地质通报*, 2003, 22(10): 775-781.
- LI Huaikun, LU Songnian, CHEN Zhihong, et al. Zircon U-Pb geochronology of rift-type volcanic rocks of the Yaolinghe group in the South Qinling orogen[J]. *Geological Bulletin of China*, 2003, 22(10): 775-781.
- 李平, 陈隽璐, 张越, 等. 商丹俯冲增生带南缘土地沟-池沟地区侵入岩形成时代及地质意义[J]. *西北地质*, 2023, 56(2): 10-27.
- LI Ping, CHEN Junlu, ZHANG Yue, et al. The Formation Age of Intrusions from Tudigou-Chigou Region in Southern Margin of Shangdan Subduction-Accretion Belt and Its Geological Significance[J]. *Northwestern Geology*, 2023, 56(2): 10-27.
- 李王晔. 西秦岭-东昆仑造山带蛇绿岩及岛弧型岩浆岩的年代学和地球化学研究—对特提斯洋演化的制约[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008: 1-124.
- LI Wangye. Geochronology and geochemistry of the ophiolites and island-arc-type igneous rocks in the western Qinling orogen and the eastern Kunlun orogen: implication for the evolution of the Tethyan ocean[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2008: 1-124.
- 李亦飞, 罗金海, 徐欢, 等. 西秦岭伯阳-元龙地区中泥盆统变砂岩碎屑锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征及地质意义[J]. *地质论评*, 2018, 64(5): 1087-1103.
- LI Yifei, LUO Jinhai, XU Huan, et al. Detrital Zircon U-Pb Age, geochemical characteristics and geological significance of meta-sandstones from Boyang-Yuanlong area in the western Qinling orogenic belt[J]. *Geological Review*, 2018, 64(5): 1087-1103.
- 林慈鑫. 河南鲁山地区太古代片麻岩系的地球化学、锆石年代学及其构造环境[D]. 西安: 西北大学, 2006: 1-72.
- LIN Ciluan. Geochemistry, geochronology and tectonic settings of archean gneisses in Lushan, Henan Province[D]. Xi'an: Northwest University, 2006: 1-72.
- 林振文, 秦艳, 周振菊, 等. 南秦岭勉略带钵厂沟火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2013, 29(1): 83-94.
- LIN Zhenwen, QIN Yan, ZHOU Zhenju, et al. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks at Huachangou area, Mianlue suture, South Qinling[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2013, 29(1): 83-94.

- 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 等. 南秦岭武当群、耀岭河群及基性侵入岩群锆石 U-Pb 同位素年代学及其地质意义[J]. *科学通报*, 2007, 52(12): 1445–1456.
- LING Wenli, REN Bangfang, DUAN Ruichun, et al. Zircon U-Pb isotopic chronology of Wudang group, Yaolinghe group and basic intrusive rock group in South Qinling Mountains and its geological significance[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(12): 1445–1456.
- 刘宝星. 勉略构造带横观河构造混杂岩带地质特征及区域构造研究[D]. 西安: 长安大学, 2020: 1–71.
- LIU Baoxing. Study on the geological characteristics and tectonic of Hengxianhe mélanges belt in Mianlue tectonic zone[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020: 1–71.
- 刘会彬, 裴先治, 丁仁平, 等. 西秦岭天水市元龙地区新元古代花岗质片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 定年及地质意义[J]. *地质通报*, 2006, 25(11): 1315–1320.
- LIU Huibin, PEI Xianzhi, DING Sanping, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Neoproterozoic granitic gneisses in the Yuanlong area, Tianshui city, west Qinling, China and their geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(11): 1315–1320.
- 刘仁燕, 牛宝贵, 李崇. 南秦岭武当群锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. *岩石矿物学杂志*, 2020, 39(6): 751–768.
- LIU Renyan, NIU Baogui, LI Chong. Zircon SHRIMP U-Pb dating of the Wudang group in South Qinling belt and its geological significance[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2020, 39(6): 751–768.
- 刘伟. Columbia 超大陆在扬子陆块西缘的响应[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019: 1–124.
- Liu Wei. Response to Columbia supercontinent in the western margin of Yangtze block[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019: 1–124.
- 罗芬红. 北秦岭构造带西段秦岭岩群的物质组成、形成时代及其变质特征研究[D]. 西安: 西北大学, 2019: 1–98.
- LUO Fenhong. Composition, forming age and metamorphism of the Qinling group in the western segment of the North Qinling orogenic belt[D]. Xi'an: Northwest University, 2019: 1–98.
- 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*, 2007, 81(11): 1550–1561.
- PEI Xianzhi, DING Saping, LI Zuocheng, 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*, 2007, 81(11): 1550–1561.
- 彭守涛, 李忠, 许承武. 库车坳陷北缘白垩世源区特征: 来自盆地碎屑锆石 U-Pb 年龄的信息[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 956–966.
- PENG Shoutao, LI Zhong, XU Chengwu. Provenance of early cretaceous deposits in Kuqa subbsin, the southern margin of Tianshan: implication from detrital zircon LA-ICP-MS age data[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 956–966.
- 任光明, 庞维华, 潘桂堂, 等. 扬子陆块西缘中元古代菜子园蛇绿混杂岩的厘定及其地质意义[J]. *地质通报*, 2017, 36(11): 2061–2075.
- REN Guangming, PANG Weihua, PAN Guitang, et al. Ascertainment of the mesoproterozoic Caiziyan ophiolitic mélange on the western margin of the Yangtze block and its geological significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(11): 2061–2075.
- 任龙. 秦岭造山带西段唐藏地区加里东-印支期岩浆作用及地质意义[D]. 广州: 中国科学院大学广州地球化学研究所, 2019: 1–168.
- REN Long. The caledonian and indosinian magmatism in the Tangzang area of the western Qinling orogenic belt and their tectonic implications[D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of geochemistry, University of Chinese Academy of Sciences, 2019: 1–168.
- 尚渊甲. 秦祁结合部早古生代岩浆事件及地质意义[D]. 西安: 西北大学, 2021: 1–50.
- SHANG Yuanjia. The early paleozoic magmatic events in the tectonic conjunction of the Qinling-Qilian orogen and tis geological significance[D]. Xi'an: Northwest University, 2021: 1–50.
- 苏文博, 李怀坤, Huff W D, 等. 铁岭组钾质斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 年代学研究及其地质意义[J]. *科学通报*, 2010, 55(22): 2197–2206.
- SU Wenbo, LI Huaikun, HUFF W D, et al. SHRIMP U-Pb dating for a K-bentonite bed in the Tieling formation, North China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(22): 2197–2206.
- 王海杰, 陈丹玲, 任云飞, 等. 北秦岭构造带与华北板块关系探讨: 来自宽坪岩群碎屑锆石 U-Pb 年代学与变质作用证据[C]. 中国地球科学联合学术年会, 2020: 341.
- WANG Haijie, CHEN Danling, REN Yunfei, et al. Discussion on the relationship between north Qinling tectonic belt and North China plate: evidence from Clastic zircon U-Pb chronology and metamorphism of Kuanping group[C]. Annual Meeting of China Geoscience Association, 2020: 341.
- 王洪亮, 徐学义, 陈隽璐, 等. 南秦岭略阳鱼洞子岩群磁铁石英岩形成时代的锆石 U-Pb 年代学约束[J]. *地质学报*, 2011, 85(8): 1284–1290.

- WANG Hongliang, XU Xueyi, CHEN Junlu, et al. Constraints from zircon U-Pb chronology of Yudongzi group magnetite-quartzite in the Lueyang area, Southern Qinling, China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(8): 1284–1290.
- 王梦玺, 王焰, 赵军红. 扬子板块北缘周庵超镁铁质岩体锆石 U-Pb 年龄和 Hf-O 同位素特征: 对源区性质和 Rodinia 超大陆裂解时限的约束[J]. *科学通报*, 2012, 57(34): 3283–3294.
- WANG Mengxi, WANG Yan, ZHAO Junhong. Zircon U-Pb dating and Hf-O isotopes of the Zhouan ultramafic intrusion in the northern margin of the Yangtze block, SW China: constrains on the nature of mantle source and timing of the supercontinent Rodinia breakup[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(34): 3283–3294.
- 王清海, 杨德彬, 许文良. 华北陆块东南缘新元古代基性岩浆活动: 徐淮地区辉绿岩床群岩石地球化学、年代学和 Hf 同位素证据[J]. *中国科学:地球化学*, 2011, 41(6): 796–815.
- WANG Qinghai, YANG Debin, XU Wenliang. Neoproterozoic basic magmatism in the southeast margin of North China craton: evidence from whole-rock geochemistry, U-Pb and Hf isotopic study of zircons from diabase swarms in the Xuzhou-HuaiBei area[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2011, 41(6): 796–815.
- 王银川, 裴先治, 李佐臣, 等. 祁连造山带东端张家川地区长宁驿中元古代花岗质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其构造意义[J]. *地质通报*, 2012, 31(10): 1576–1587.
- WANG Yinchuan, PEI Xianzhi, LI ZuoCheng, et al. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Mesoproterozoic granitic gneisses at Changningyi of Zhangjiachuan area on the eastern edge of the Qilian Orogenic belt[J]. *Geological Bulletin of China*, 2012, 31(10): 1576–1587.
- 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): 1589–1605.
- WU Yuanbao, ZHENG Yongfei. Genetic mineralogy of zircon and its constraints on U-Pb age interpretation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1589–1605.
- 肖庆辉, 李晓波, 贾跃明, 等. 当代造山带研究中值得重视的若干前沿问题[J]. *地学前缘*, 1995, 2(1–2): 43–50.
- XIAO Qinghui, LI Xiaobo, JIA Yueming, et al. Frontiers on orogenic researches[J]. *Earth Science Frontiers*, 1995, 2(1–2): 43–50.
- 徐多勋, 魏立勇, 张振, 等. 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[J]. *西北地质*, 2020, 53(2): 102–125.
- XU Duoxun, WEI Liyong, ZHANG Zhen, et al. U-Pb age, geochemical characteristics and sedimentary environment analysis of detrital zircons from the Longwuhe formation in Lintan area, West Qinling[J]. *Northwestern Geology*, 2020, 53(2): 102–125.
- 徐通. 秦岭南缘勉略构造带康县-略阳地区组成特征及构造演化研究[D]. 西安: 长安大学, 2016: 1–112.
- XU Tong. Component features and tectonic evolution of Mianlue tectonic zone in Kangxian-Lueyang area, south margin of Qinling orogen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2016: 1–112.
- 徐学义, 夏林圻, 陈隽璐, 等. 扬子地块北缘西乡群孙家河组火山岩形成时代及元素地球化学研究[J]. *岩石学报*, 2009, 25(12): 3309–3326.
- XU Xueyi, XIA Linqi, CHEN Junlu, et al. Zircon U-Pb dating and geochemical study of volcanic rocks from Sunjiahe formation of Xixiang group in northern margin of Yangtze plate[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(12): 3309–3326.
- 薛怀民, 马芳, 宋永勤. 扬子克拉通北缘随(州)-枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. *岩石学报*, 2011, 27(4): 1116–1130.
- XUE Huaimin, MA Fang, SONG Yongqin. Geochemistry and SHRIMP zircon U-Pb data of Neoproterozoic meta-magmatic rocks in the Suizhou-Zaoyang area, northern margin of the Yangtze Craton, Central China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(4): 1116–1130.
- 闫全人, 王宗起, 陈隽璐, 等. 北秦岭斜峪关群和草滩沟群火山岩成因的地球化学和同位素约束、SHRIMP 年代及其意义[J]. *地质学报*, 2007, 81(4): 488–502.
- YAN Quanren, WANG Zongqi, CHEN Junlu, et al. Tectonic setting and SHRIMP age of volcanic rocks in the Xieyuguan and Caotangou groups: implications for the North Qinling orogenic belt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(4): 488–502.
- 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.
- YAN Yi, LIN Ge, LI Zian. Provenance tracing of sediments by means of synthetic study of shape, composition and chronology of zircon[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2003, 27(2): 184–190.
- 雍拥, 肖文交, 袁超, 等. 中祁连东段花岗岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义[J]. *新疆地质*, 2008, 26(1): 62–70.
- YONG Yong, XIAO Wenjiao, YUAN Chao, et al. LA-ICP-MS zircon

- U-Pb ages of granitic plutons from the eastern sector of the central Qilian and their geologic implication[J]. *Xinjiang Geology*, 2008, 26(1): 62-70.
- 张健, 田辉, 李怀坤, 等. 华北克拉通北缘 Columbia 超大陆裂解事件: 来自燕辽裂陷槽中部长城系碱性火山岩的地球化学、锆石 U-Pb 年代学和 Hf 同位素证据[J]. *岩石学报*, 2015, 31(10): 3129-3146.
- ZHANG Jian, TIAN Hui, LI Huaikun, et al. Age, geochemistry and zircon Hf isotope of the alkaline basaltic rocks in the middle section of the Yan-liao aulacogen along the northern margin of the North China Craton: new evidence for the break-up of the Columbia supercontinent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 31(10): 3129-3146.
- 张欣, 徐学义, 宋公社, 等. 西秦岭略阳地区鱼洞子杂岩变形花岗岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 测年及地质意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(4): 510-517.
- ZHANG Xin, XU Xueyi, SONG Gongshe, et al. Zircon LA-ICP-MS U-Pb dating and significance of Yudongzi group deformation granite from Lueyang area, Western Qinling, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 2010, 29(4): 510-517.
- 赵太平, 翟明国, 夏斌, 等. 熊耳群火山岩锆石 SHRIMP 年代学研究: 对华北克拉通盖层发育初始时间的制约[J]. *科学通报*, 2004, 46(22): 2342-2346.
- ZHAO Taiping, ZHAI Mingguo, XIA Bin, et al. SHRIMP zircon chronology of volcanic rocks in Xionger group: constraints on the initial development time of the caprock of the North China craton[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 46(22): 2342-2346.
- 祝禧艳, 陈福坤, 王伟, 等. 豫西地区秦岭造山带武当群火山岩和沉积岩锆石 U-Pb 年龄[J]. *地球学报*, 2008, 29(6): 817-829.
- ZHU Xiyan, CHEN Fukun, WANG Wei, et al. Zircon U-Pb ages of volcanic and sedimentary rocks of the Wudang group in the Qinling orogenic belt with in Western Henan Province[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(6): 817-829.
- Anderson T. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 2002, 192: 59-79.
- Bhatia M R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones[J]. *The Journal of Geology*, 1983, 91(6): 611-627.
- Boynton MV. Cosmochemistry of the rare earth elements: meteorite studies[A]. In: Henderson P(ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*[M]. New York: Elsevier, 1984, 63-114.
- Dickinson W R. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones[J]. *Provenance of Arenites*, 1985, 148: 333-361.
- Floyd P A, Leveridge B E. Tectonic environment of the Devonian Gramscatho basin, south Cornwall: Framework mode and geochemical evidence from turbiditic sandstones[J]. *Journal of the Geological Society*, 1987, 144(4): 531-542.
- Hoskin P W O. Rare earth element chemistry of zircon and its use as provenance indicator[J]. *Geology*, 2002, 28(8): 627-630.
- McLennan S, Hemming S, McDaniel D. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics[J]. *Special Papers-Geological Society of America*, 1993, 89: 21-21.
- Rogers J J, Santosh M. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2002, 5: 5-22.
- Sun S S, McDonough W F. Chemical and isotope systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes[A]. In: Saunders A D and Norry M J. *Magmatism in the Ocean Basins*[M]. Geological Society Special Publication, 1989, 42: 313-345.