

南秦岭中生代东河群碎屑锆石 U-Pb 年龄及其地质意义

杨 涛, 张亚峰, 杨 玲, 易鹏飞, 何元方, 仵 桐

(陕西省地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘 要: 南秦岭微陆块是秦岭造山带的重要构造单元, 为了探讨南秦岭中生代断陷盆地的物质来源, 本文选取凤太地区下白垩统东河群田家坝组复成分砾岩、周家湾组凝灰质砂岩为研究对象, 对其中的碎屑锆石进行了 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素测年, 获得 2 组各 40 个有效年龄。结果明显可以分为 5 个年龄峰, 范围分别是: 2 595 ~ 2 771 Ma、1 215 ~ 1 916 Ma、749 ~ 1 142 Ma、424 ~ 576 Ma、218 ~ 306 Ma, 分别对应 Kenor、Columbia、Rodinia、Gondwana、Pangaea 等 5 次超大陆事件。通过对测年数据进行分析, 结合区域地质资料, 认为北秦岭增生造山带和华北板块为南秦岭中生代盆地提供了大部分的物源, 扬子板块次之, 北祁连造山带和西秦岭北缘构造带也有一定的贡献。

关键词: 碎屑锆石测年; 东河群; 早白垩世; 中生代盆地; 南秦岭

中图分类号: P578.94⁺1; P597⁺.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2018)02-0211-19

Detrital zircon U-Pb age of Mesozoic Donghe Group in South Qinling Mountain and its geological significance

YANG Tao, ZHANG Ya-feng, YANG Ling, YI Peng-fei, HE Yuan-fang and WU Tong

(Shaanxi Center of Geological Survey, Xi'an 710068, China)

Abstract: The South Qinling microcontinent is one of the important tectonic units of the Qinling orogenic belt. In order to study the provenance of sediments in Mesozoic graben basin in South Qinling, the authors conducted LA-ICP-MS zircon U-Pb isotopic dating on polymictic conglomerate of Tianjiaba Formation and tuff sandstone of Zhoujiawan Formation of Lower Cretaceous in Fengtai area. Two groups of dating data were obtained, which have 40 effective ages respectively. The results show that the zircon ages have five age peaks with ranges of 2 595 ~ 2 771 Ma, 1 215 ~ 1 916 Ma, 749 ~ 1 142 Ma, 424 ~ 576 Ma and 218 ~ 306 Ma, which correspond respectively to Kenor, Columbia, Rodinia, Gondwana and Pangaea supercontinent events. Based on zircon dating analyses and combined with the regional geological data, it is concluded that the North Qinling accretion-type orogen and the North China plate provided the dominant clastic materials for the Mesozoic basin in South Qinling, followed by the Yangtze plate. The North Qilian orogenic belt and the northern margin of West Qinling orogenic belt also contributed to the provenance of sediments in the Mesozoic basin of South Qinling.

Key words: detrital zircon dating; Donghe Group; early Cretaceous; Mesozoic basin; South Qinling

Fund support: Geological Survey Project of Finance Special in Shaanxi Province (20150101)

收稿日期: 2017-03-02; 接受日期: 2018-01-11

基金项目: 陕西省财政专项地质调查资助项目(20150101)

作者简介: 杨 涛(1981-), 男, 硕士, 主要从事区域地质调查工作, E-mail: 4480418@qq.com。

造山带为沉积盆地的形成提供了丰富的物源,其形成和演化控制着沉积盆地的成因、物质组成和充填序列,造山带物源区的构造属性和物质组成可以通过研究沉积记录获得(Dickinson and Suczek, 1979; 陈衍景, 1996; 李任伟等, 2005)。沉积岩中的碎屑矿物(如锆石、石榴子石、磷灰石和白云母)在识别沉积物源区和古老大陆边缘的演化历史的研究中发挥了重要的作用(Sun *et al.*, 2009; 胡波等, 2009; Wang *et al.*, 2010; Yan *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2011),特别是碎屑锆石,其年龄谱系特征可直接反映沉积物源区岩石的年龄组成(Drewery *et al.*, 1987; Geslin *et al.*, 1999)。

南秦岭的构造演化极为复杂,自新元古代以来,南秦岭由多期不同的构造运动叠加改造形成(张国伟等, 1996, 2001; 杨志华等, 2002; 于在平等, 2003)。中生代以来,受走滑作用影响,形成中生代山间断陷盆地,沉积了大量早白垩世沉积物,这些沉

积物是研究南秦岭微陆块物质来源和发展演化的理想对象,但前人的研究主要集中在甘肃境内西秦岭地区(张英利等, 2011; 毛世东等, 2013),而对南秦岭地区研究较少,这在一定程度上限制了对南秦岭微陆块物质源区及发展演化的认识。本文运用 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年方法,在野外地质调查的基础上,对南秦岭凤太地区东河群田家坝组成分砾岩、周家湾组凝灰质砂岩中的锆石进行了年代学研究,结合区域地质资料,分析探讨南秦岭中生代断陷盆地沉积物源区及相应构造事件,为研究南秦岭构造演化提供依据。

1 地质背景

凤太地区中生代沉积盆地位于凤县-太白县平木一带,东西长约 80 km,南北宽约 10~15 km,盆地东窄西宽,呈近东西向楔形展布(图1),盆地北侧为

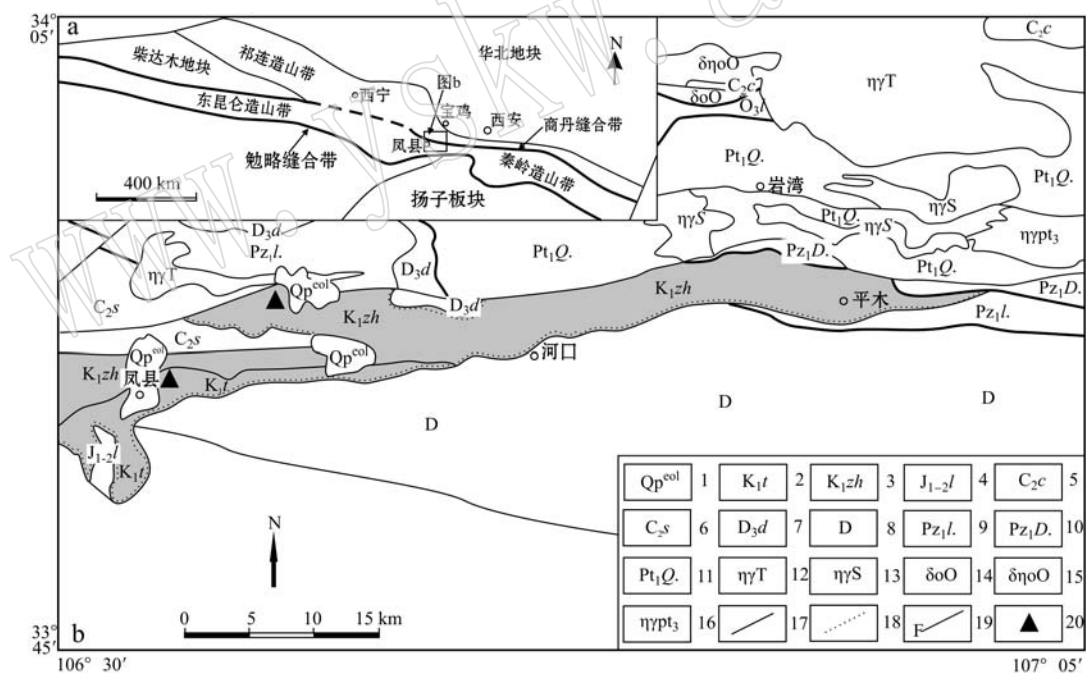


图1 研究区地质略图(据陕西地质调查院)^①

Fig. 1 Sketch geological map of the study area (after Shaanxi Academy of Geological Survey)^①

1—第四系; 2—下白垩统东河群田家坝组; 3—下白垩统东河群周家湾组; 4—下-中侏罗统龙家沟组; 5—中石炭统草凉驿组; 6—中石炭统四峡口组; 7—上泥盆统大草滩组; 8—泥盆系地层; 9—下古生界罗汉寺岩组; 10—下古生界丹凤岩群; 11—下元古界秦岭岩群; 12—白垩纪花岗岩闪长岩; 13—三叠纪二长花岗岩; 14—志留纪二长花岗岩; 15—奥陶纪石英闪长岩; 16—奥陶纪石英二长闪长岩; 17—新元古代二长花岗岩; 18—不整合界线; 19—断层界线; 20—采样点

1—Quaternary; 2—Tianjiaba Formation of Lower Cretaceous Donghe Group; 3—Zhoujiawan Formation of Lower Cretaceous Donghe Group; 4—Lower-Middle Jurassic Longjiagou Formation; 5—Middle Carboniferous Caoliangyi Formation; 6—Middle Carboniferous Sixiakou Formation; 7—Upper Devonian Dacotaan Formation; 8—Devonian; 9—Lower Palaeozoic Luohansi Rock Group; 10—Lower Palaeozoic Danfeng Group; 11—Lower Proterozoic Qinling Group; 12—Cretaceous granodiorite; 13—Triassic monzonitic granite; 14—Silurian monzonitic granite; 15—Ordovician quartz diorite; 16—Ordovician quartz monzodiorite; 17—Neoproterozoic monzonitic granite; 18—unconformity; 19—fault boundary; 20—sampling location

① 陕西省地质调查院. 2013. 1:500 000 陕西省地质图.

古元古代秦岭岩群片麻岩、片岩、大理岩等;西与中生代徽成盆地相接;南侧为晚古生代泥盆纪千枚岩、变砂岩、粉砂质板岩、结晶灰岩等;东南缘为早古生代罗汉寺岩组变砂岩、千枚岩、片岩等。盆地内东河群总体为一套河湖相碎屑岩沉积建造,以角度不整合超覆于泥盆系-石炭系地层之上。

2 东河群沉积特征

东河群为一套紫红色-灰绿色巨厚层-厚层-中薄层状河湖相碎屑岩沉积建造,北与古元古界秦岭

岩群、早古生界丹凤岩群、早古生界罗汉寺岩组呈断层接触,局部与晚泥盆统大草滩组呈不整合接触;向西延伸出研究区与西侧中生代徽成盆地相接;南与泥盆系、侏罗系地层呈角度不整合接触,向东逐渐尖灭。岩性主要为紫红色、浅灰、黄绿色砾岩、含砾砂岩、粉砂岩夹泥页岩,局部夹含煤线(图2)。沉积环境以河流相为主,兼有湖沼相。通过野外地质调查,根据岩石颜色、沉积韵律、岩石组合等特征,研究区内东河群自下而上可分为田家坝组(K_1t)和周家湾组(K_1zh),二者呈整合接触,周家湾组可进一步分为上、下两个段。

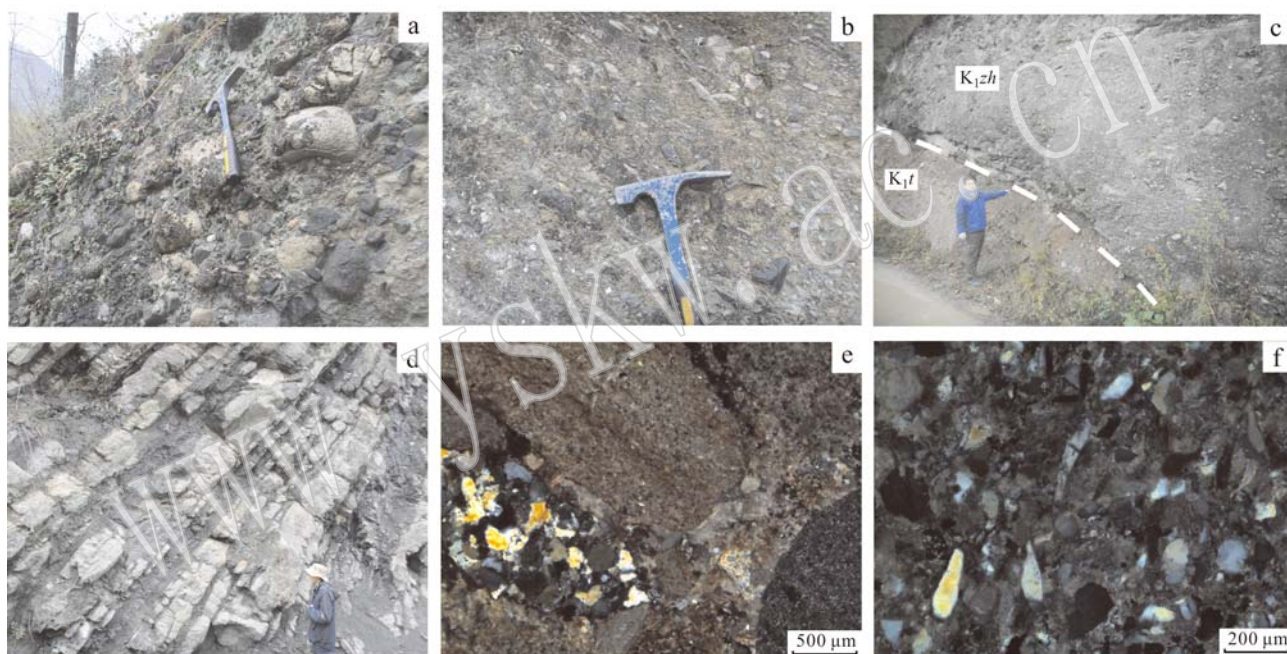


图2 东河群的宏观和显微照片(+)

Fig. 2 Macrophotographs and microphotographs of Donghe Group (+)

a—田家坝组砾石特征; b—周家湾组砾岩宏观特征; c—田家坝组与周家湾组整合接触; d—周家湾组灰绿色砂岩、泥岩互层;

e—田家坝组砾岩镜下特征; f—周家湾组砾岩镜下特征

a—characteristics of gravels in Tianjiaba Formation; b—macro characteristics of gravels in Zhoujiawan Formation; c—conformable contact between Tianjiaba Formation and Zhoujiawan Formation; d—grayish green sandstone interbedded with mudstone in Zhoujiawan Formation; e—microscopic features of gravels in Tianjiaba Formation; f—microscopic features of gravels in Zhoujiawan Formation

2.1 田家坝组

田家坝组主要分布在凤县县城北部消灭寺和县城南部胡家阳坡-喂子洞一带,与上覆周家湾组整合接触,与南侧地层呈角度不整合接触,为一套紫红色巨厚层状砾岩,夹有少量中厚层砂岩、薄层粉砂岩,其中砾石成分较为复杂,主要为砂岩、灰岩,含少量片麻岩、花岗岩等,呈块状、棱角状、板片状,砾径一般在(3~5) cm × (2~3) cm,最大可达 35 cm × 40

cm(图2a),泥质胶结,基质支撑(图2e)。砾岩中砾石大小混杂,无方向性和分选性,局部可见砾石呈叠瓦状排列,为多次洪水期与平水期而形成的沉积,地层总厚度约 250~920 m。

2.2 周家湾组

周家湾组主要分布于凤县双石铺-河口-核桃坝一带,与下伏田家坝组为整合接触(图2c)。与其北侧地层呈断层或角度不整合接触。由西向东,呈现

自下而上碎屑物粒度由粗变细,成分由复杂到简单,单层厚度由厚变薄的变化特征;地层沉积厚度 850 ~ 1 300 m。按照岩性组合和沉积环境特征,周家湾组可进一步分为两个段。

下段岩性(砾、砂夹泥)为灰-灰绿色中厚层砾岩、砂砾岩夹黄色、杂色中-薄层细-粉砂岩、灰色粉砂质泥岩,砾岩砾石一般 1 ~ 5 cm,砾石呈次棱角状-次圆状(图 2b),颗粒-基质支撑,基质为砂质(图 2f)。可见砾石呈叠瓦状排列,发育平行层理,砾岩底部多见冲刷充填构造,细砂岩中发育槽状交错层理,为砾质辫状河道沉积,砾岩上部的细-粉砂岩、泥岩,为泛滥平原沉积。

上段岩性(泥夹砂)为灰、灰绿、杂色中-厚层含砾砂岩、细-粉砂岩、粉砂质泥岩组成由粗变细的多个沉积旋回(图 2d),每个沉积旋回底部的砂岩与下伏泥岩之间具冲刷面,旋回的下部砂岩中多发育槽状交错层理,上部粉砂岩与泥岩互层,泥岩中发育水平层理,具明显的二元沉积结构,为曲流河沉积。

3 样品特征及分析

3.1 样品位置

本次工作采集了田家坝组下部紫红色复成分砾岩和周家湾组上段灰绿色凝灰质砂岩 2 件样品进行锆石年龄测试,采样地理坐标为北纬 33°54'31"、东经 106°31'47"和北纬 34°00'27"、东经 106°37'53",采样位置见图 1。

3.2 样品制样

样品粉碎后,通过磁选、电磁选法从中挑选出锆石精矿,再挑出晶形和透明度较好的锆石晶体作为 U-Th-Pb 同位素测定对象。锆石分选和阴极发光照相分别在咸阳核工业二〇三研究所和西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。

3.3 样品分析及数据处理

在西北大学大陆动力学国家重点实验室的 LA-ICP-MS 仪器上用标准测定程序对锆石微区原位 U-Th-Pb 同位素年龄进行分析,仪器型号为 Agilent7500a 型四极杆质谱仪和 Geolas200M 型激光剥蚀系统,激光器为 193 nm ArF 准分子激光器。激光剥蚀斑束直径为 32 μm ,激光剥蚀样品的深度为 20 ~ 40 μm 。数据处理采用 GLITTER(ver4.0, Macquarie University)程序和 Andersen 软件(Andersen, 2002),年龄计算及协和图绘制采用 ISOPLOT(2.49

版)软件(Ludwig, 2003)完成。详细的实验原理和流程及仪器参见参考文献(Yuan *et al.*, 2004)。

前人研究表明(Gehrels *et al.*, 1999; Sircombe, 1999; Blank *et al.*, 2003),年龄大于 1 000 Ma 的锆石往往存在铅丢失的现象,但 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 比值却比较稳定,因此锆石的结晶年龄可以用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄;对于小于 1 000 Ma 的锆石,由于 Pb 丢失情况较少,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄。为了计算数据更加精确,以 $(^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \text{ 年龄})/(^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \text{ 年龄})$ 为标准计算谐和度(Gehrels *et al.*, 1999; Nelson and Gehrels, 2007; Kalsbeek *et al.*, 2008; Gonzaleoz-Len *et al.*, 2009),谐和度在 80% ~ 120% 之间的数据为有效数据。由表可知(表 1、表 2),本文采用的数据均为有效数据,年龄大于 1 000 Ma 的锆石,采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 的年龄;年龄小于 1 000 Ma 的锆石,采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄进行统计计算和成图。

4 分析结果

4.1 田家坝组复成分砾岩锆石特征

观察 CL 图像(图 3),田家坝组砾岩锆石主要以浅玫瑰色为主、玫瑰色少量,以次圆-浑圆状为主,柱状次之。粒度多集中在 100 ~ 200 μm ,长宽比约 2 ~ 3。大部分晶体表面粗糙,凹坑常见,光泽暗淡,透明度差,呈弱金刚光泽,毛玻光泽,晶内红色固相包体发育,气液包体少量,个别表面有赘生物粘连,少量晶体透明度高,呈金刚光泽,晶面较光滑。CL 图像显示多数锆石振荡环带结构清晰,Th/U 比值多大于 0.4,具有典型岩浆锆石特征。

从田家坝组制靶的 270 颗锆石中选取晶形较好,无裂纹发育的 40 粒锆石进行 U-Pb 年龄测定,获得有效年龄数据 40 个,分析结果见表 1。锆石 U-Pb 谐和图和年龄频谱图见图 4,在谐和图中锆石 U-Pb 年龄变化范围在 $282 \pm 3 \text{ Ma}$ ~ $2\ 771 \pm 18 \text{ Ma}$ 之间,年龄频谱图中显示 U-Pb 有效年龄可分为 5 组,范围分别为 282 ~ 306 Ma、426 ~ 576 Ma、768 ~ 1 142 Ma、1 690 ~ 1 916 Ma、2 595 ~ 2 771 Ma,其中以 426 ~ 576 Ma、768 ~ 1 142 Ma、1 690 ~ 1 916 Ma 三组年龄较为集中。282 ~ 306 Ma 区间共有 2 个测点,占总有效测点的 5%,两者 Th/U 比值均为 0.89,CL 图像显示 16 号测点位于所测锆石的核部,震荡环带清晰,为岩浆成因锆石,其年龄为 $306 \pm 3 \text{ Ma}$;21 号测点位于所测锆石的边部环带上,其年龄为 $282 \pm 3 \text{ Ma}$ 。

表 1 田家坝组紫红色复成分砾岩(样品 TJB-1RZ)中锆石的 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 1 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotope analytical results of zircon from Tianjiaba Formation purple polymictic conglomerate(sample TJB-1RZ)

点号	$w_B/10^{-6}$				同位素比值及误差						年龄/Ma						谐和度/%
	Pb	Th	U	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
1	49	54	60	0.90	0.1934	0.002 7	14.300 5	0.153 4	0.536 2	0.004 1	2.771	22	2 770	10	2 768	17	100
2	6	31	68	0.46	0.056 7	0.002 4	0.582 5	0.023 6	0.074 5	0.000 8	479	91	466	15	463	5	97
3	13	76	128	0.59	0.057 5	0.001 6	0.641 1	0.016 4	0.080 9	0.000 7	508	60	503	10	502	4	99
4	29	42	62	0.68	0.117 3	0.001 9	5.576 5	0.076 3	0.344 6	0.002 6	1 916	29	1 913	12	1 909	13	100
5	55	68	271	0.25	0.073 8	0.001 1	1.757 1	0.021 8	0.172 6	0.001 1	1 037	31	1 030	8	1 026	6	99
6	10	67	54	1.24	0.065 4	0.002 1	1.175 5	0.035 8	0.130 3	0.001 3	787	66	789	17	790	7	100
7	54	72	235	0.31	0.076 6	0.001 1	2.022 0	0.022 6	0.191 4	0.001 2	1 111	28	1 123	8	1 129	6	102
8	19	142	191	0.74	0.056 3	0.001 4	0.587 5	0.012 9	0.075 7	0.000 6	464	53	469	8	470	3	101
9	35	152	194	0.78	0.064 8	0.001 1	1.213 3	0.017 5	0.135 8	0.000 9	768	36	807	8	821	5	107
10	16	59	66	0.90	0.074 7	0.001 8	1.803 4	0.038 9	0.175 2	0.001 5	1 059	47	1 047	14	1 041	8	98
11	142	305	561	0.54	0.077 8	0.000 9	2.113 2	0.017 2	0.197 0	0.001 1	1 142	24	1 153	6	1 159	6	102
12	31	233	323	0.72	0.056 4	0.001 2	0.567 0	0.010 5	0.072 9	0.000 5	467	46	456	7	454	3	97
13	164	74	420	0.18	0.116 3	0.001 6	5.199 0	0.053 4	0.324 2	0.002 1	1 901	24	1 853	9	1 810	10	95
14	40	349	394	0.88	0.056 2	0.001 0	0.574 4	0.008 7	0.074 2	0.000 5	459	39	461	6	461	3	100
15	47	169	478	0.35	0.059 8	0.001 0	0.666 0	0.009 4	0.080 8	0.000 5	596	36	518	6	501	3	84
16	5	71	80	0.89	0.052 0	0.002 5	0.348 2	0.016 0	0.048 6	0.000 5	286	105	303	12	306	3	107
17	12	18	26	0.68	0.103 6	0.002 5	4.639 8	0.103 4	0.324 8	0.003 4	1 690	44	1 757	19	1 813	16	107
18	24	27	54	0.50	0.112 9	0.002 0	5.186 9	0.081 2	0.333 2	0.002 8	1 847	32	1 851	13	1 854	13	100
19	53	213	597	0.36	0.063 5	0.000 9	0.629 8	0.007 0	0.072 0	0.000 4	724	30	496	4	448	2	62
20	18	98	89	1.10	0.065 9	0.001 5	1.243 9	0.024 7	0.137 0	0.001 0	802	45	821	11	828	6	103

续表 1
Continued Table 1

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值及误差				年龄/Ma				谐和度/%				
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
21	8	121	136	0.89	0.055 0	0.001 9	0.339 6	0.011 1	0.044 8	0.000 4	412	75	297	8	282	3	69
22	15	30	31	0.99	0.112 3	0.002 2	5.132 9	0.092 1	0.331 7	0.003 0	1 836	36	1 842	15	1 846	15	101
23	23	123	246	0.50	0.057 0	0.001 2	0.571 3	0.010 3	0.072 7	0.000 5	493	44	459	7	452	3	92
24	36	135	191	0.70	0.067 1	0.001 2	1.303 3	0.020 4	0.140 9	0.001 0	840	37	847	9	850	5	101
25	53	306	527	0.58	0.057 3	0.001 0	0.613 3	0.008 7	0.077 7	0.000 5	502	36	486	5	482	3	96
26	85	166	492	0.34	0.065 1	0.000 9	1.260 0	0.012 2	0.140 3	0.000 8	778	27	828	5	847	4	109
27	18	131	164	0.80	0.056 7	0.001 6	0.627 2	0.016 8	0.080 2	0.000 7	479	62	494	11	498	4	104
28	10	123	59	2.09	0.058 8	0.002 0	0.758 7	0.024 8	0.093 5	0.000 9	561	73	573	14	576	5	103
29	22	65	109	0.59	0.068 3	0.001 4	1.427 3	0.026 5	0.151 6	0.001 1	877	42	900	11	910	6	104
30	16	29	35	0.84	0.109 7	0.002 1	4.895 4	0.083 8	0.323 7	0.002 8	1 794	34	1 802	14	1 808	14	101
31	18	29	39	0.76	0.108 2	0.002 0	4.877 5	0.082 1	0.326 8	0.002 8	1 770	34	1 798	14	1 823	14	103
32	23	219	233	0.94	0.054 0	0.001 1	0.509 0	0.009 6	0.068 3	0.000 5	371	47	418	6	426	3	115
33	23	130	121	1.07	0.063 3	0.001 4	1.152 3	0.022 4	0.131 9	0.001 0	720	45	778	11	799	6	111
34	129	77	171	0.45	0.173 8	0.001 9	13.204 5	0.087 5	0.550 8	0.003 1	2 595	18	2 694	6	2 828	13	109
35	12	89	114	0.78	0.068 1	0.001 8	0.685 2	0.016 2	0.072 9	0.000 6	872	52	530	10	454	4	52
36	48	126	285	0.44	0.065 6	0.001 1	1.182 4	0.017 3	0.130 6	0.000 8	795	35	792	8	791	5	100
37	42	95	228	0.42	0.070 1	0.001 4	1.384 7	0.025 0	0.143 1	0.001 1	932	41	882	11	862	6	92
38	8	67	82	0.82	0.056 5	0.001 8	0.563 8	0.017 0	0.072 4	0.000 7	470	69	454	11	451	4	96
39	35	60	225	0.27	0.064 8	0.001 1	1.130 9	0.015 4	0.126 6	0.000 8	767	34	768	7	768	5	100
40	37	49	239	0.21	0.065 6	0.001 1	1.175 3	0.015 7	0.129 9	0.000 8	792	33	789	7	788	5	99

表 2 周家湾组灰绿色凝灰质砂岩(样品 ZJW-1RZ)中锆石的 LA-ICP-MS U-Th-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS U-Th-Pb isotope analytical results of zircon from Zhoujiawan Formation grayish green tuff sandstone(sample ZJW-1RZ)

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值及误差				年龄/Ma				谐和度/%				
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ		
1	77	150	414	0.36	0.070 4	0.000 8	1.441 6	0.010 2	0.148 7	0.000 8	940	23	906	4	894	4	95
2	76	72	395	0.18	0.071 6	0.000 8	1.572 8	0.011 6	0.159 5	0.000 8	974	24	960	5	954	5	98
3	26	89	110	0.80	0.073 5	0.001 1	1.725 6	0.019 3	0.170 5	0.001 0	1 027	29	1 018	7	1 015	5	99
4	54	27	78	0.35	0.181 1	0.002 0	12.676 0	0.085 5	0.508 0	0.002 8	2 663	18	2 656	6	2 648	12	99
5	19	60	122	0.49	0.064 6	0.001 1	1.095 7	0.014 7	0.123 2	0.000 7	760	34	751	7	749	4	99
6	12	111	118	0.94	0.057 4	0.001 1	0.537 8	0.008 4	0.068 0	0.000 4	507	40	437	6	424	3	84
7	64	149	336	0.44	0.074 7	0.000 9	1.519 4	0.012 6	0.147 6	0.000 8	1 060	24	938	5	887	4	84
8	53	66	254	0.26	0.074 8	0.001 0	1.753 3	0.015 6	0.170 1	0.000 9	1 063	25	1 028	6	1 013	5	95
9	44	85	234	0.36	0.069 9	0.000 9	1.468 4	0.012 1	0.152 4	0.000 8	925	25	918	5	914	5	99
10	37	86	184	0.47	0.070 4	0.000 9	1.5490	0.015 2	0.159 6	0.000 9	940	27	950	6	955	5	102
11	37	79	194	0.41	0.068 5	0.001 0	1.428 0	0.015 2	0.151 3	0.000 9	883	29	901	6	908	5	103
12	52	129	259	0.50	0.069 1	0.000 8	1.477 8	0.011 7	0.155 2	0.000 8	901	24	921	5	930	5	103
13	4	93	88	1.05	0.050 3	0.002 1	0.242 3	0.009 5	0.034 9	0.000 3	210	92	220	8	221	2	105
14	100	218	268	0.82	0.096 3	0.001 2	3.496 8	0.032 0	0.263 3	0.001 5	1 554	24	1 527	7	1 507	8	97
15	57	85	297	0.29	0.070 0	0.000 9	1.512 7	0.014 7	0.156 8	0.000 9	928	27	936	6	939	5	101
16	13	101	130	0.77	0.058 0	0.001 1	0.565 3	0.009 8	0.070 7	0.000 5	530	43	455	6	440	3	83
17	95	314	344	0.91	0.083 6	0.001 0	2.190 3	0.016 4	0.190 0	0.001 0	1283	23	1 178	5	1 121	5	87
18	9	38	97	0.39	0.060 2	0.001 6	0.623 2	0.015 2	0.075 1	0.000 6	611	56	492	10	467	4	76
19	52	65	300	0.22	0.069 6	0.001 0	1.392 9	0.016 2	0.145 1	0.000 9	917	30	886	7	873	5	95
20	12	107	122	0.88	0.054 3	0.001 0	0.534 7	0.008 6	0.071 4	0.000 5	382	41	435	6	445	3	116

续表 2
Continued Table 2

点号	$w_B/10^{-6}$			Th/U	同位素比值及误差				年龄/Ma				谐和度/%				
	Pb	Th	U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$			
21	49	86	243	0.35	0.072 3	0.000 9	1.655 8	0.015 7	0.166 1	0.000 9	994	26	992	6	991	5	100
22	68	236	394	0.60	0.065 2	0.000 7	1.177 8	0.008 5	0.131 0	0.000 7	780	24	790	4	794	4	102
23	92	185	228	0.81	0.100 0	0.001 2	3.976 9	0.029 4	0.288 3	0.001 6	1 625	21	1 630	6	1 633	8	101
24	13	21	30	0.69	0.109 9	0.001 6	4.964 1	0.058 5	0.327 4	0.002 2	1 798	26	1 813	10	1 826	11	102
25	53	161	277	0.58	0.068 8	0.001 0	1.387 7	0.016 5	0.146 3	0.000 9	892	30	884	7	880	5	99
26	45	72	255	0.28	0.068 0	0.001 0	1.345 0	0.015 4	0.143 3	0.000 8	870	30	865	7	863	5	99
27	26	213	268	0.80	0.056 0	0.000 8	0.556 8	0.006 4	0.072 1	0.000 4	452	32	449	4	449	2	99
28	73	71	362	0.20	0.073 9	0.001 0	1.751 8	0.018 9	0.171 8	0.001 0	1 039	28	1 028	7	1 022	6	98
29	44	440	435	1.01	0.054 7	0.000 7	0.543 2	0.004 8	0.072 0	0.000 4	399	28	441	3	448	2	112
30	13	89	68	1.32	0.065 1	0.001 2	1.138 6	0.017 4	0.126 8	0.000 8	778	37	772	8	769	5	99
31	81	202	288	0.70	0.080 7	0.001 0	2.327 6	0.022 1	0.209 0	0.001 2	1 215	25	1 221	7	1 223	6	101
32	76	337	209	1.62	0.086 0	0.001 0	2.561 4	0.020 9	0.216 0	0.001 2	1 337	23	1 290	6	1 261	6	94
33	50	90	266	0.34	0.070 0	0.000 8	1.490 5	0.012 1	0.154 2	0.000 8	930	24	927	5	925	5	99
34	16	292	351	0.83	0.049 8	0.000 9	0.236 4	0.003 5	0.034 4	0.000 2	185	40	216	3	218	1	118
35	76	93	256	0.36	0.091 9	0.001 1	2.919 6	0.022 2	0.230 3	0.001 3	1 465	22	1 387	6	1 336	7	91
36	26	348	515	0.68	0.052 7	0.000 8	0.278 4	0.003 5	0.038 3	0.000 2	317	35	249	3	242	1	76
37	95	226	417	0.54	0.073 4	0.000 8	1.736 5	0.012 1	0.171 5	0.000 9	1 025	22	1 022	4	1 020	5	100
38	52	67	305	0.22	0.070 1	0.000 9	1.412 4	0.013 5	0.146 0	0.000 8	931	26	894	6	879	5	94
39	25	47	119	0.40	0.077 0	0.001 4	1.826 4	0.028 8	0.171 8	0.001 2	1 122	36	1 055	10	1 022	7	91
40	38	47	130	0.36	0.088 2	0.001 1	2.889 4	0.023 5	0.237 4	0.001 3	1 387	23	1 379	6	1 373	7	99

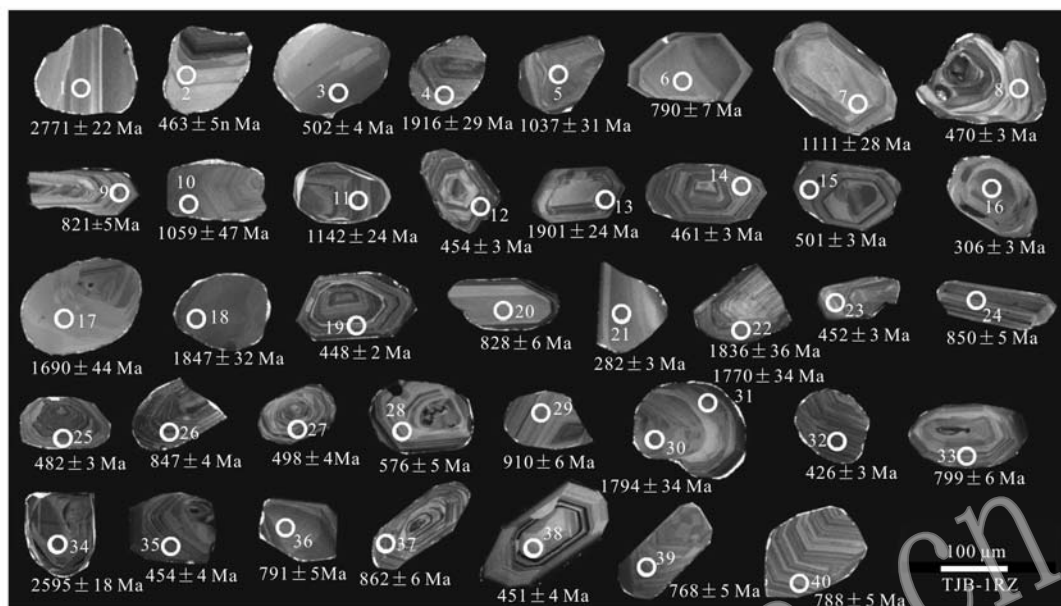


图3 田家坝组复成分砾岩(TJB-1RZ)中锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 Cathodoluminescence images of analyzed zircons of Tianjiaba Formation complex conglomerate sample(TJB-1RZ)

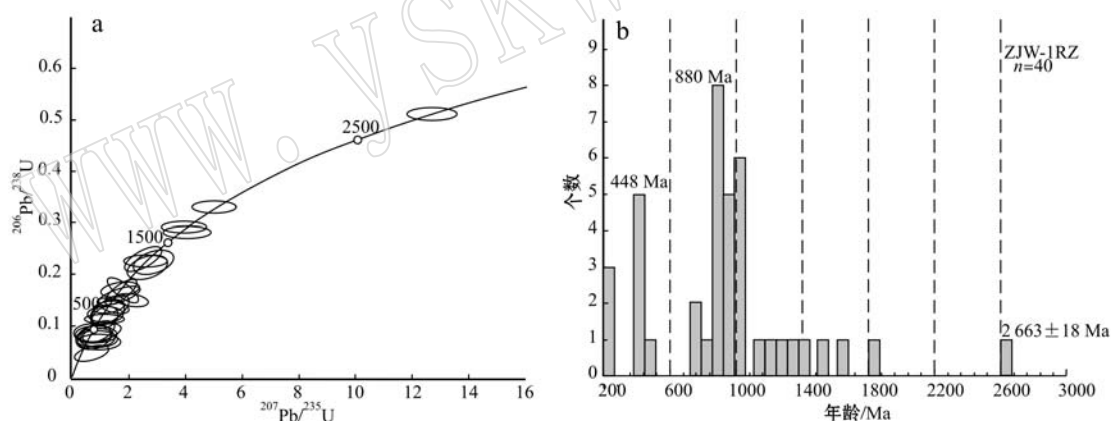


图4 田家坝组锆石 U-Pb 谐和图(a)和年龄频谱图(b)

Fig. 4 U-Pb concordia plot (a) and age spectrogram of zircon (b) from Tianjiaba Formation

426 ~ 576 Ma 区间共有 14 个碎屑锆石测点, 占田家坝组总有效数据的 35%, 相对概率峰值为 450 Ma。其 Th/U 比值在 0.35 ~ 2.09 之间。38 号测点靠近核部位置, 其余点位均处于边部环带上。CL 图像显示, 以 8、12、14 号测点为代表的该期锆石振荡环带清晰, 为岩浆成因锆石。

768 ~ 1 142 Ma 区间共有 15 个测点, 占总有效测点的 37.5%, 其又可分为两个年龄集中段, 分别为 760 ~ 910 Ma 和 1 037 ~ 1 142 Ma。相对概率峰值分别为 790 Ma、1 095 Ma。Th/U 比值在 0.21 ~ 1.24

之间, 其中 5、20、24、36、40 号 5 个测点位于核部, 其余测点处于边部环带上。CL 图像显示 6、9、10 等测点, 锆石振荡环带清晰, 为岩浆成因锆石。5、7、26 等测点呈均质结构、扇形分带, 为变质成因。

1 690 ~ 1 916 Ma 区间共有 7 个测点, 占总有效测点的 17.5%, 相对概率峰值为 1 810 Ma, 其 Th/U 比值在 0.4 ~ 0.99 之间, 结合 CL 图像综合分析, 30 号测点位于核部, 4、13、17、18、22、31 号测点位于锆石边部振荡环带上, 锆石振荡环带清晰, 为岩浆成因锆石。

2 595 ~ 2 771 Ma 区间共有 2 个测点, 占总有效测点的 5%, 其 Th/U 比值为 0.9 和 0.45, 年龄为 2 595 Ma 和 2 771 Ma, CL 图像显示其呈带状、面状结构, 为变质成因。

4.2 周家湾组灰绿色凝灰质砂岩锆石特征

周家湾组砂岩锆石主要以浅玫瑰色为主、暗玫瑰色少量, 多呈次圆状, 少量次棱角柱状, 偶见棱角

柱状, 粒径大多在 90 ~ 120 μm , 长宽比多为 1.5, 少量为 2 ~ 4。部分晶体表面较粗糙, 凹坑常见, 晶内气液包体较发育, 呈金刚光泽, 透明度较高, 少见裂纹及赘生物等。CL 图像显示图 5, 锆石多具清晰的岩浆生长环带、核幔结构等, Th/U 值 0.18 ~ 1.62, 具有典型岩浆锆石特征。

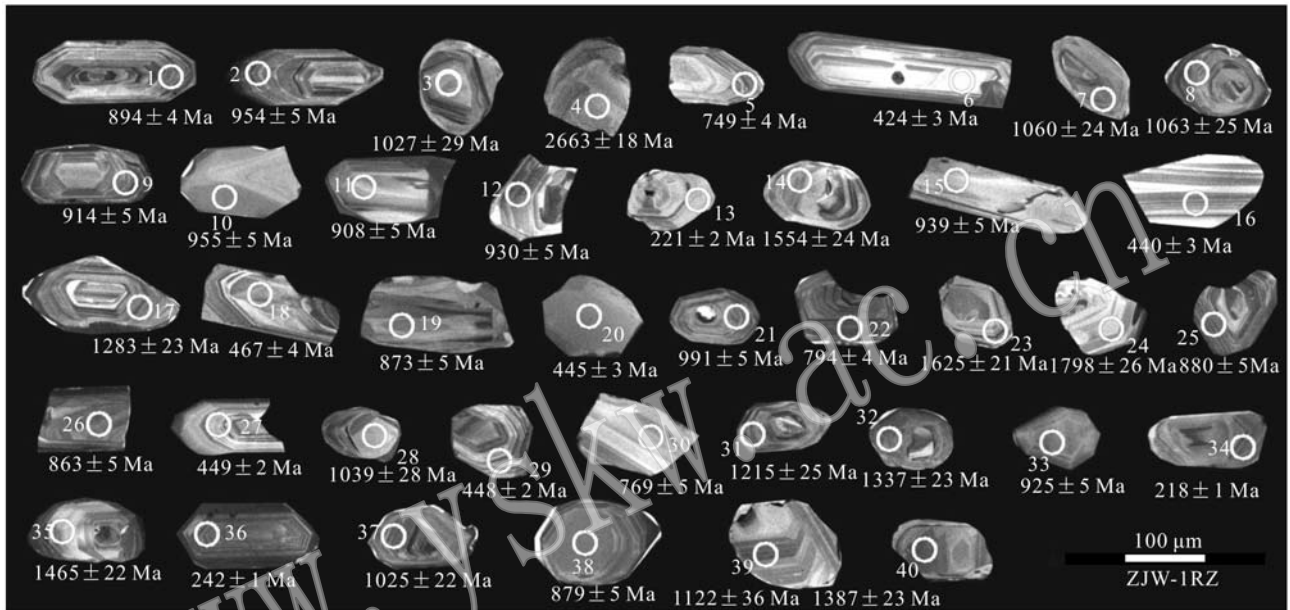


图 5 周家湾组凝灰质砂岩 (ZJW-1RZ) 中锆石阴极发光 (CL) 图像

Fig. 5 Cathodoluminescence images of analyzed zircons of Zhoujiawan Formation tuff sandstone sample (ZJW-1RZ)

从周家湾组制靶的 320 颗锆石中选取晶形较好, 无裂纹的 40 粒锆石进行 U-Pb 年龄测定, 获得有效年龄数据 40 个, 分析结果见表 2。锆石 U-Pb 谐和图和年龄频谱图见图 6, 在谐和图中锆石 U-Pb 年龄变化范围在 $218 \pm 1 \text{ Ma}$ ~ $2663 \pm 18 \text{ Ma}$ 之间, 年龄频谱图显示年龄可分为 5 组, 分别为 218 ~ 242 Ma、424 ~ 467 Ma、749 ~ 1 122 Ma、1 215 ~ 1 798 Ma、2 663 Ma。其中峰值主要集中在 424 ~ 467 Ma、749 ~ 1 122 Ma 这两个年龄区间。

218 ~ 242 Ma 区间共有 3 个测点, 占总有效测点的 7.5%, 其中测点 13、34、36 所处部位均为碎屑锆石的边部, Th/U 比值在 0.68 ~ 1.05 之间, CL 图像显示其振荡环带清晰, 为岩浆成因锆石。

424 ~ 467 Ma 区间共有 6 个测点, 占总有效测点的 15%, 相对概率峰值为 448 Ma。其 Th/U 比值在 0.39 ~ 1.01 之间, 16 号、20 号测点位于锆石的核部, 其余测点均位于锆石边部, CL 图像显示其振荡环带

清晰, 为岩浆成因锆石。

749 ~ 1 122 Ma 区间共有 22 个测点, 占总有效测点的 55%, 相对概率峰值为 880 Ma。其 Th/U 比值在 0.18 ~ 1.32 之间, 3、15、26、28、30、38 号测点位于锆石的核部, 其余测点均位于锆石边部, CL 图像显示, 5、22、25、30 号测点锆石振荡环带清晰, 为岩浆成因锆石。其他测点多呈面状、扇形分带, 为变质成因锆石。

1 215 ~ 1 798 Ma 区间共有 8 个测点, 占总有效测点的 20%。其碎屑锆石年龄较为分散, Th/U 比值在 0.36 ~ 1.62 之间, 所测点均位于锆石边部。CL 图像显示锆石振荡环带清晰, 为岩浆成因锆石。

2 663 Ma 的年龄只有 1 个测点, 占总有效测点的 2.5%, Th/U 比值为 0.36, 其年龄为 $2663 \pm 18 \text{ Ma}$, CL 图像显示锆石呈面状, 为变质成因锆石。

碎屑锆石年龄的复杂性, 说明东河群的物源非常复杂, 进一步说明了南秦岭微陆块构造演化的复

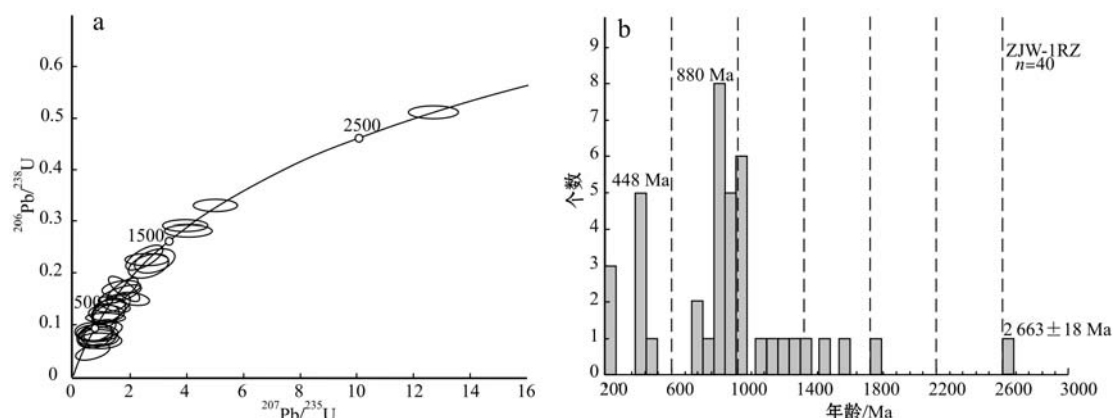


图6 周家湾组锆石 U-Pb 谐和图(a)和年龄频谱图(b)

Fig. 6 U-Pb concordia plot (a) and age spectrogram of zircon (b) from Zhoujiawan Formation

杂性。

5 讨论

5.1 沉积物源

东河群碎屑锆石 U-Pb 年龄频谱图出现多个峰(图 4b、图 6b), 分布在 2 595 ~ 2 771 Ma、1 690 ~ 1 916 Ma、1 215 ~ 1 798 Ma、749 ~ 1 142 Ma、424 ~ 576 Ma、218 ~ 306 Ma 等区间, 表明东河群物源的复杂性。下面通过分组讨论, 探讨凤太地区南秦岭中生代盆地的物质来源。

在 218 ~ 306 Ma 区间范围内, 田家坝组和周家湾组分别有 5% 和 7.5% 的沉积物源来自这一时期的岩石, 峰值在 230 ~ 240 Ma 左右, 与 Pangaea 超大陆形成时间相吻合, 这些锆石 CL 图像振荡环带清晰, 属于近源搬运沉积的岩浆锆石, 而商丹带北侧该期岩浆岩广泛发育。研究表明其为岩浆弧背景下的产物(Jiang *et al.*, 2010; 陈衍景, 2010; Li *et al.*, 2011a; Ni *et al.*, 2012; 李诺, 2012)。因此, 北秦岭晚古生带岩浆弧带可能是该期沉积物的源区。

田家坝组和周家湾组分别有 35% 和 15% 的沉积物源自 426 ~ 576 Ma 和 424 ~ 467 Ma 的岩石, 其相对概率峰值分别为 450 Ma 和 448 Ma, 在年龄频谱图上呈现出强烈的峰值特征(图 4b、图 6b)。该时期在我国被称为加里东期(胡受奚等, 1988), 国际上称为 Gondwana 和 Laurentia 超大陆形成期。该期锆石以岩浆锆石为主, 呈自形, 长板状, 表明其属于近源沉积。

区域资料研究表明(胡受奚等, 1988; 陈衍景

等, 2009), 北秦岭增生造山带的沟-弧-盆体系发育。沿秦岭活动陆块边缘, 由西向东形成有复合岩浆弧杂岩带, 如武山县桦林沟辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 440 ± 5 Ma; 鸳鸯镇辉长闪长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 456 ± 3 Ma(李王晔, 2008); 关子镇蛇绿岩中变辉长岩年龄为 499.7 ± 1.8 Ma(裴先治等, 2007c); 关子镇蛇绿岩北侧海子下辉长岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 489 ± 10 Ma(李王晔, 2008); 百花-利桥地区的变辉长岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 434.6 ± 1.5 Ma(裴先治等, 2007b); 凤县唐藏片麻状英云闪长岩、红花铺英云闪长岩体锆石 U-Pb 年龄为 454 ± 1.7 Ma 和 450 ± 1.8 Ma(王洪亮等, 2006; 陈隽璐等, 2008); 宝鸡岩湾蛇绿混杂岩的形成年龄为 483 ± 13 Ma(Zhai and Liu, 2003); 陕西眉县斜峪关群玄武岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 472 ± 11 Ma(闫全人等, 2007a); 小王涧淡色花岗岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 442 ± 7 Ma(闫全人等, 2007b)(图 7)。上述年龄表明, 北秦岭增生造山带为东河群 420 ~ 570 Ma 碎屑锆石的源区。

田家坝组和周家湾组分别有 37.5% 和 55% 的沉积物源自 768 ~ 1 142 Ma 和 749 ~ 1 122 Ma 的岩石, 该期年龄在锆石年龄频谱图上也呈现出强烈的峰值特征(图 4b、图 6b)。这一时期恰好与 Rodinia 超大陆汇聚和裂解时间相一致。锆石 CL 图像显示, 该期锆石一类为岩浆成因, 一类为变质成因或为再循环碎屑锆石。

前人研究表明, 在中元古代晚期和新元古代初期。华北克拉通内部发育有少量基性岩墙($\sim 1\,000$ Ma, Liu *et al.*, 2006); 而在北秦岭地区的秦岭岩群

中发育有大量 980 ~ 930 Ma 的同碰撞或后碰撞花岗岩类,被认为是 Grenvillian 造山运动(1 300 ~ 1 000 Ma)的产物(张成立等, 2004; Chen *et al.*, 2006),松树沟蛇绿岩全岩 Sm-Nd 等时线年龄为 1 030 Ma,也被认为是 Grenvillian 运动的响应(Dong *et al.*, 2008);而宽坪岩群变质沉积岩中含有大量 1 000 ~ 900 Ma 的岩浆成因的碎屑锆石(Zhu *et al.*, 2011)(图 7)。900 ~ 700 Ma 期间,华北克拉通南缘和北秦岭造山带发生造山后伸展,碱性花岗岩类和基性岩浆岩发育,如河南方城双山正长岩体的锆石 U-Pb 年龄为 844.3 ± 1.6 Ma(Bao *et al.*, 2008);栾川县侵入栾川群的辉长岩锆石 U-Pb 年龄为 830 ± 6 Ma(Wang *et al.*, 2011)(图 7)。700 ~ 500 Ma 期间,前人在研究北祁连造山带岩浆事件(Enkelmann *et al.*, 2007)及北秦岭-北祁连大草滩群物源时(吴树宽等, 2012),都缺失 700 ~ 500 Ma 年龄段的碎屑锆石,本次研究同样缺失上述年龄段的碎屑锆石,表明研究区缺乏 700 ~ 500 Ma 间的岩浆构造活动或该时期的岩浆构造活动对东河群物质组成贡献较小。

因此,华北古板块 Grenvillian 造山运动及造山后形成的岩浆-变质杂岩为该年龄段东河群碎屑锆石可能的源区。

Grenvillian 造山运动在扬子陆块内部和周缘表现的更为强烈,有学者(Zheng, 2003)建议将其作为区分扬子与华北克拉通元古宙演化的重要标志。900 Ma 时,扬子陆块东南缘与华夏陆块拼接碰撞,随后发生南华裂解事件(Zhang *et al.*, 2008);在扬子板块北缘,沿随县-安康-碧口一线,发育有众多岩浆弧,并通过增生型造山作用成为扬子古板块的一部分(陈衍景等, 1992; 林振文等, 2013),它们构成了此后“南秦岭微陆块”的变质基底。大量的花岗岩类与镁铁质侵入岩,广泛出露于扬子陆块西缘和西北缘,其年龄集中于 740 ~ 860 Ma(Zhou *et al.*, 2002; Li *et al.*, 2003; 陆松年等, 2005; 凌文黎等, 2006; Sun *et al.*, 2009);而南秦岭微陆块沉积岩中碎屑锆石年龄(745 ~ 910 Ma 峰值年龄为 805 Ma)和碧口群火山岩锆石年龄(776 ~ 840 Ma)也多集中在这一时间段(闫全人等, 2003; Sun *et al.*, 2009)(图 7)。因

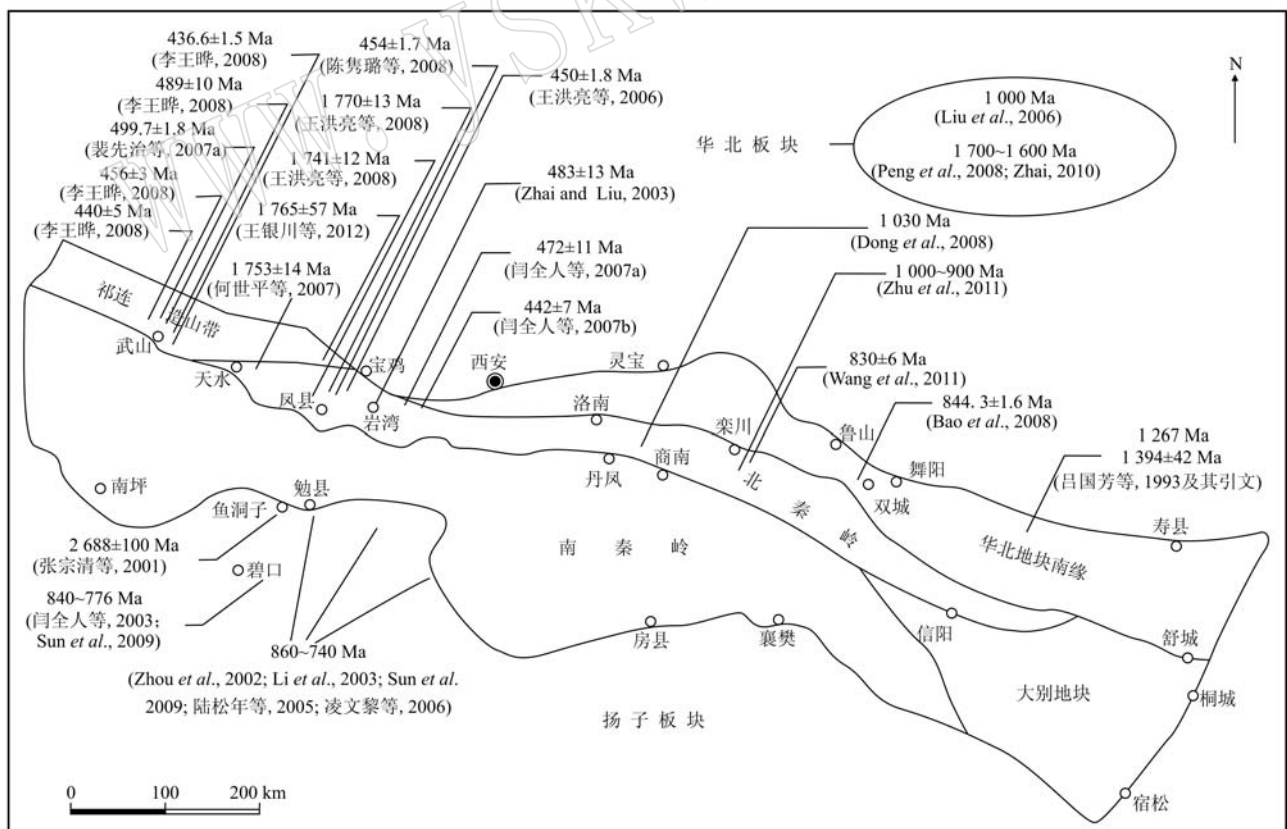


图 7 研究区中生代盆地物源区年龄数据分布图[据张国伟等(2001)修改]

Fig. 7 Distribution of age data of clastic materials area of Mesozoic Basin in the study area(modified after Zhang Guowei *et al.*, 2001)

因此, 扬子古板块具有向东河群提供碎屑锆石或再循环碎屑锆石的可能性。

田家坝组和周家湾组分别有 17.5% 和 20% 的沉积物源自 1 690 ~ 1 916 Ma 和 1 215 ~ 1 798 Ma 的岩石, 田家坝组相对概率峰值为 1 810 Ma。这组锆石年龄值反映了研究区及其邻区包括扬子、华北板块在内的中元古代-古元古代基底岩系的年龄信息。

前人研究表明, 天水东岔镇一带宽坪岩群的形成年龄为 $1\,753 \pm 14$ Ma (何世平等, 2007); 祁连构造带东端陇山岩群花岗质片麻岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $1\,765 \pm 57$ Ma (王银川等, 2012); 北秦岭构造带西段宝鸡地区太白岩基坚固沟变形侵入体结晶年龄为 $1\,741 \pm 12$ Ma、宝鸡岩基胡基店变形侵入体的结晶年龄为 $1\,770 \pm 13$ Ma (王洪亮等, 2008)。1 800 Ma 之后华北克拉通发生造山后伸展和裂解作用, 多处发育 1 600 ~ 1 700 Ma 之间的岩浆岩, 特别是基性岩墙 (Peng *et al.*, 2008; Zhai, 2010) 图 7。事实上, 华北板块基底发育了广泛的与 Columbia 超大陆裂解有关的构造-热事件群, 时代约为 1.8 ~ 1.6 Ga (陆松年等, 2002; 赵国春等, 2002; 翟明国等, 2007; Zhao, 2007; 赵国春, 2009)。同时, 北秦岭地体在中元古代 (1 600 ~ 1 400 Ma) 也存在一期重要的岩浆作用事件 (杨力等, 2010)。

因此, 1 690 ~ 1 916 Ma 的碎屑锆石年龄与华北板块基底、西秦岭北缘构造带、北祁连造山带基底岩浆活动时间具有较好的一致性, 暗示该年龄段物源区可能为华北板块基底、西秦岭北缘构造带基底岩系, 甚至包括北祁连造山带。

周家湾组 1 215 ~ 1 798 Ma 间碎屑锆石年龄较分散。区域上华北克拉通南缘在该时期发育了官道口群和汝阳群沉积地层, 其中高山河组或云梦山组前人获得 Rb-Sr 等时线年龄为 $1\,394 \pm 42$ Ma 和 $1\,267$ Ma (吕国芳等, 1993 及其引文), 见图 7, 与该组年龄有较好的相似性。因此, 上述地区可能为其物源区。

所测锆石中, 年龄在 2 600 Ma 左右的有 3 颗, 年龄值分别为 2 771 Ma、2 663 Ma 和 2 595 Ma, 锆石呈它形, 可能为变质成因。锆石形态呈浑圆状, 说明其经历了沉积物的再循环过程间接搬运而来。

在 2 300 ~ 2 600 Ma 期间, 扬子板块鱼洞子群变质岩 Sm-Nd 同位素等时线年龄为 $2\,688 \pm 100$ Ma (张宗清等, 2001) (图 7)。华北克拉通绿岩带广泛发育 (胡受奚等, 1988; Chen *et al.*, 1997), 同时发生了广泛的岩浆事件和多个太古宙花岗绿岩地体或陆块

的拼贴、碰撞作用 (Zhai *et al.*, 2000; Zhao *et al.*, 2002; Zhai, 2010; 耿元生等, 2010)。北祁连陇山岩群中存在 1 900 Ma、2 350 Ma 和 2 500 Ma 三期构造岩浆事件, 其中 2 500 Ma 代表了基底结晶年龄 (何艳红等, 2005)。西秦岭构造带也可能存在古元古代-新太古代的结晶基底杂岩 (裴先治等, 2007b)。与此同时, 在全球范围内发生了超大陆汇聚事件, 形成了基诺 (Kenor) 超大陆 (Bekker and Eriksson, 2003; Tang *et al.*, 2011)。通过古元古代-新太古代的年龄特征和该阶段岩浆事件的对比, 认为华北板块和扬子板块基底岩系、北祁连和西秦岭北缘构造带结晶基底均可能为东河群提供物源。

碎屑锆石统计结果表明 (图 4b, 图 6b), 田家坝组碎屑锆石年龄集中出现在 450 Ma $\pm$ 、 790 Ma $\pm$ 和 $1\,810$ Ma $\pm$; 周家湾组碎屑锆石年龄集中出现在 448 Ma $\pm$ 和 880 Ma $\pm$; 其中 $440 \sim 460$ Ma $\pm$ 、 $800 \sim 1\,000$ Ma $\pm$ 是东河群碎屑锆石年龄集中出现的两个最主要时间段。由前述可知, $440 \sim 460$ Ma 碎屑锆石的源区主要为北秦岭增生造山带; $800 \sim 1\,000$ Ma 碎屑锆石的源区主要为华北古板块, 扬子古板块也具有向该时段东河群提供碎屑锆石或再循环碎屑锆石的可能性。 $1\,810$ Ma $\pm$ 的碎屑锆石主要出现在田家坝组, 说明在周家湾组沉积时期, 该套地质体已经被剥蚀殆尽。

前人研究结果表明 (李玮等, 2013), 西秦岭地区中生代沉积盆地白垩纪古水流方向为自北北东向南南西, 盆地西南缘古流向为自南向北, 表明白垩纪盆地在形成过程中, 沉积物物源来自盆地北侧的秦岭增生造山带、华北板块北和南侧的扬子板块。张英利对研究区西邻徽成盆地早白垩世物源进行了研究, 在田家坝组花岗岩砾石和周家湾组砂岩中分别获得了 25 组、89 组有效年龄。锆石的年龄频谱特征显示, 其碎屑年龄也可分为 5 组: $2\,526$ Ma、 $1\,572 \sim 1\,948$ Ma、 $629 \sim 1\,182$ Ma、 $421 \sim 490$ Ma、 $186 \sim 240$ Ma (张英利等, 2011), 对应于 5 次全球性超大陆事件, 锆石年龄对比和古水流分析结果均表明其物源来自于盆地南北两侧地层, 与本文研究结果相一致。

综上所述, 南秦岭东河群中生代-晚古生代年龄组 (218 ~ 306 Ma) 碎屑锆石的来源主要为北秦岭晚古生带岩浆弧带; 早古生代年龄组 (424 ~ 576 Ma) 碎屑锆石的来源主要为北秦岭增生造山带, 扬子板块也有一定的贡献; 新元古代-中元古代年龄组 (749 ~ 1 142 Ma) 碎屑锆石的来源主要为华北古板块, 扬子

古板块也有一定的贡献;中元古代-古元古代年龄组(1 215 ~ 1 916 Ma)碎屑锆石的来源主要为华北板块基底岩系,西秦岭北缘构造带基底岩系和北祁连造山带也有一定的贡献;新太古代年龄组(2 595 ~ 2 771 Ma)碎屑锆石的来源主要为华北板块基底岩系、扬子板块基底岩系,北祁连和西秦岭北缘构造带结晶基底也有一定的贡献。因此,凤太地区中生代断陷盆地北侧的北秦岭增生造山带、华北板块为研究区内东河群的主要物源区,扬子板块为次要物源,西北方向的北祁连造山带和西秦岭北缘构造带也有一定的贡献。

5.2 构造热事件

东河群田家坝组碎屑锆石的 U-Pb 有效年龄记录了至少 4 期构造热事件,分别是 282 ~ 306 Ma、426 ~ 576 Ma(相对概率峰值为 450 Ma)、1 037 ~ 1 142 Ma、1 690 ~ 1 916 Ma(相对概率峰值为 1 810 Ma)。其中峰值为 450 Ma 的碎屑锆石具有显著的优势,这与秦岭活动陆块边缘形成复合岩浆弧带的平均形成年龄相一致,说明北秦岭增生造山带在此期间存在规模较大的岩浆活动。282 ~ 306 Ma 间数据较少,表明岩浆活动较为微弱;1 037 ~ 1 142 Ma 的碎屑锆石指示了 Grenvillian 造山运动(1 300 ~ 1 000 Ma)期间的岩浆活动;峰值为 1 810 Ma 的碎屑锆石指示了与 Columbia 超大陆裂解有关的岩浆活动。

东河群周家湾组碎屑锆石的 U-Pb 有效年龄记录了至少 3 期构造热事件,分别是 218 ~ 242 Ma、424 ~ 467 Ma(相对概率峰值为 448 Ma)、1 215 ~ 1 798 Ma。其中峰值为 448 Ma 的碎屑锆石具有显著的优势,这与田家坝组锆石特征一致,表明北秦岭增生造山带在此期间存在大规模的岩浆活动。218 ~ 242 Ma 期间碎屑锆石年龄数据较少,表明该期岩浆活动较为微弱;1 215 ~ 1 798 Ma 岩浆成因锆石也标志着该期岩浆活动发育。

区域上发育 206 ~ 220 Ma、446 ~ 455 Ma、1 000 ~ 1 300 Ma 和 1 800 ~ 2 050 Ma 岩浆活动(孙卫东等,2000; Zhao *et al.*, 2000, 2001, 2002, 2005; 闫全人等, 2003, 2007a, 2007b; 张成立等, 2004; Chen *et al.*, 2006; Lai *et al.*, 2007; 王涛等, 2009; Santosh, 2010; Li *et al.*, 2011b),这与东河群碎屑锆石限定的岩浆活动时间相吻合。

6 结论

(1) 南秦岭凤太地区中生代断陷盆地早白垩世

东河群沉积物中碎屑锆石年龄完整记录了 5 次全球性超大陆事件: Kenor(2 595 ~ 2 771 Ma)、Columbia(1 215 ~ 1 916 Ma)、Rodinia(749 ~ 1 142 Ma)、Gondwana(424 ~ 576 Ma)和 Pangaea(218 ~ 306 Ma)。

(2) 结合区域地质资料,通过对南秦岭凤太地区东河群田家坝组复成分砾岩、周家湾组凝灰质砂岩中碎屑锆石的年龄谱特征及锆石 CL 图像的分析,认为其物源区主要为盆地北侧的北秦岭增生造山带和华北古板块,扬子古板块为次要物源区,盆地西北部的北祁连造山带和西秦岭北缘构造带也有一定的物质贡献。

致谢 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄测试得到了西北大学大陆动力学国家重点实验室柳小明博士的大力支持和热心帮助;两位匿名评审人提出了诸多宝贵而中肯的意见,在此一并表示衷心的感谢!

References

- Anderson T. 2002. Correction of common Pb in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1): 59 ~ 79.
- Bao Zhiwei, Wang Qiang, Bai Guodian, *et al.* 2008. Geochronology and geochemistry of the Fangcheng Neoproterozoic alkali-syenites in East Qinling orogen and its geodynamic implications[J]. *Chinise Science Bulletin*, 53(13): 2 050 ~ 2 061.
- Bekker A and Eriksson K A. 2003. A Paleoproterozoic drowned carbonate platform on the southeastern margin of the Wyoming Craton: A record of the Kenorland breakup[J]. *Precambrian Research*, 120(3 ~ 4): 327 ~ 364.
- Blank L P, Kamo S L, Williams I S, *et al.* 2003. The application of SHRIMP to Phanerozoic geochronology: A critical appraisal of four zircon standards[J]. *Chemical Geology*, 200(1 ~ 2): 171 ~ 188.
- Chen Junlu, Xu Xueyi, Wang Hongliang, *et al.* 2008. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of Tang zang Quartz-diorite pluton in the West segment of North Qinling Mountains and its tectonic significance[J]. *Geoscience*, 22(1): 45 ~ 52(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 1996. Progresses in application of sedimentary trace element geochemistry to probe ceustal composition and environmental change[J]. *Geology-Geochemistry*, 12(3): 7 ~ 11(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing. 2010. Indosinian tectonic setting, magmatism and metallogenesis in Qinling Orogen, Central China[J]. *Geology in China*, 37(4): 854 ~ 865(in Chinese with English abstract).

- Chen Yanjing and Fu Shigu. 1992. Gold Mineralization in West Henan, Beijing[M]. Seismological Press, 1 ~ 234(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing, Zhai Mingguo and Jiang Shaoyong. 2009. significant achievements and open issues in study of orogenesis and metallogenesis surrounding the North China continent[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 2 695 ~ 2 726(in Chinese with English abstract).
- Chen Yanjing and Zhao Yongchao. 1997. Geochemical characteristics and evolution of REE in the Early Precambrian sediments: Evidence from the southern margin of the North China craton[J]. *Episodes*, 20(2): 109 ~ 116.
- Chen Zhihong, Lu Songnian, Li Huaikun, *et al.* 2006. Constraining the role of the Qinling orogen in the assembly and break-up of Rodinia: Tectonic implications for Neoproterozoic granite occurrences[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28(1): 99 ~ 115.
- Dickinson W R and Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions[J]. *AAPG Bulletin*, 63(12): 2 164 ~ 2 182.
- Dong Yunpeng, Zhou Meifu, Zhang Guowei, *et al.* 2008. The Grenvillian Songshugou ophiolite in the Qinling Mountains, Central China: Implications for the tectonic evolution of the Qinling orogenic belt[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 32(5 ~ 6): 325 ~ 335.
- Drewery S, Cliff P A and Leeder M R. 1987. Provenance of Carboniferous sandstones from U-Pb dating of detrital zircons[J]. *Nature*, 325(6 099): 50 ~ 53.
- Enkelmann E, Wooden J, Ratschbacher L, *et al.* 2007. How was the Triassic Songpan-Ganzi basin filled? A provenance study[J]. *Tectonics*, 26(4): TC4007.
- Geng Yuansheng, Shen Qihan and Ren Liudong. 2010. Late neoarchean to early paleoproterozoic magmatic events and tectonothermal systems in the North China craton[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 1 945 ~ 1 966(in Chinese with English abstract).
- Gehrels G, Johnsson M J and Howell D G. 1999. Detrital zircon geochronology of the Adams argillite and Nation River Formation, East-Central Alaska, U. S. A[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 69: 135 ~ 144.
- Geslin J K, Link P K and Fanning C M. 1999. High-precision provenance determination using detrital-zircon ages and petrography of Quaternary sands on the eastern Snake River Plain[J]. *Idaho. Geology*, 27(4): 295 ~ 298.
- González-León C M, Valencia V A, Lawton T F, *et al.* 2009. The lower Mesozoic record of detrital zircon U-Pb geochronology of Sonora, Mexico, and its paleogeographic implications[J]. *Revista Mexicana de Ciencias*, 26: 301 ~ 314.
- He Shiping, Wang Hongliang, Xu Xueyi, *et al.* 2007. A LA-ICP-MS U-Pb Chronological study of zircons from Hongtubu basic volcanic rocks and its geological significance in the East segment of North Qinlian orogenic belt[J]. *Advances in Earth Science*, 22(2): 143 ~ 151(in Chinese with English abstract).
- He Yanhong, Sun Yong, Chen Liang, *et al.* 2005. Zircon U-Pb chronology of Longshan complex by LA-ICP-MS and its geological significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 125 ~ 134(in Chinese with English abstract).
- Hu Bo, Zhai Mingguo, Guo Jinghui, *et al.* 2009. LA-ICP-MS U-Pb geochronology of detrital zircons from the Huade Group in northern margin of the North China Craton and its tectonic significance[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 25(1): 193 ~ 211(in Chinese with English abstract).
- Hu Shouxi, Lin Qianlong, Chen Zeming, *et al.* 1988. Geology and Metallogeny of the Collisional Belt between the Northern and Southern China Ancient Plates[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1 ~ 588(in Chinese with English abstract).
- Jiang Yaohui, Jin Guodong, Liao Shiyong, *et al.* 2010. Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic constraints on the origin of Late Triassic granitoids from the Qinling orogen, Central China: Implications for a continental arc to continent-continent collision[J]. *Lithos*, 117(1 ~ 4): 183 ~ 197.
- Kalsbeek F, Frei D and Affaton P. 2008. Constraints on provenance, stratigraphic correlation and structural context of the Volta basin, Ghana, from detrital zircon geochronology: An Amazonian connection[J]. *Sedimentary Geology*, 212: 86 ~ 95.
- Lai Shaocong, Li Yongfei and Qin Jiangfeng. 2007. Geochemistry and LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of the Dongjiahe ophiolite complex from the western Bikou terrane[J]. *Science in China(Series D: Earth Sciences)*, 50(Sup. II): 305 ~ 313.
- Li Renwei, Meng Qingren and Li Shuangying. 2005. Coupling of the Jurassic and Carboniferous basins with the orogens in the Dabie Shan and adjacent area: Constraints from sedimentary record[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(4): 1 133 ~ 1 143(in Chinese with English abstract).
- Li Nuo. 2012. Process and mechanism of Yanshanian large-scale Mo accumulation in East Qinling. Ph. D. Dissertation[M]. Beijing: Peking University, 1 ~ 262(in Chinese with English abstract).
- Li Nuo, Chen Yanjing, Fletcher I R, *et al.* 2011a. Triassic mineralization with Cretaceous overprint in the Dahu Au-Mo deposit, Xiaolinling gold province: Constraints from SHRIMP monazite U-Th-Pb geochronology[J]. *Gondwana Research*, 20(2 ~ 3): 543 ~ 552.
- Li Nuo, Chen Yanjing, Santosh M, *et al.* 2011b. The 1.85 Ga Mo mineralization in the Xiong'er Terrane, China: Implications for metallog-

- eny associated with assembly of the Columbia supercontinent[J]. Precambrian Research, 186(1~4): 220~232.
- Li Wangye. 2008. 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]. University of Science and Technology of China, 1~54 (in Chinese with English abstract).
- Li Wei, Dong Yunpeng, Guo Anling, *et al.* 2013. Sedimentary fill history of the Huicheng Basin in the West Qinling Mountains and associated constraints on Mesozoic intracontinental tectonic evolution[J]. Science in China(Series D), 43(5): 730~744 (in Chinese with English abstract).
- Li Xianhua, Li Zhengxiang, Ge Wenchun, *et al.* 2003. Neoproterozoic granitoids in South China: Crustal melting above a mantle plume at ca. 825 Ma? [J]. Precambrian Research, 122(1~4): 45~83.
- Lin Zhenwen, Qin Yan, Zhou Zhenju, *et al.* 2013. Zircon U-Pb dating and geochemistry of the volcanic rocks at Huachanggou area, Mian-Lue suture, South Qinling[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 83~94 (in Chinese with English abstract).
- Ling Wenli, Gao Shan, Cheng Jianping, *et al.* 2006. Neoproterozoic magmatic events within the Yangtze continental interior and along its northern margin and their tectonic implication: constraint from the ELA-ICPMS U-Pb geochronology of zircons from the Huangling and Hannan complexes[J]. Acta Petrologica Sinica, 22(2): 387~396 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yongqing, Gao Linzhi, Liu Yanxue, *et al.* 2006. Zircon U-Pb dating for the earliest Neoproterozoic mafic magmatism in the southern margin of the North China Block[J]. Chinese Science Bulletin, 51(19): 2375~2382.
- Ludwig K R. 2003. User's manual for Isoplot/Ex version 2.49. A geochronological toolkit for Microsoft Excel[Z]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 1~56.
- Lu Songnian, Yang Chunliang, Li Huaikun, *et al.* 2002. North China continent and Columbia supercontinent [J]. Earth Science Frontiers, 9(4): 225~233 (in Chinese with English abstract).
- Lu Songnian, Chen Zhihong, Li Huaikun, *et al.* 2005. Two magmatic belts of the Neoproterozoic in the Qinling Orogenic belt[J]. Acta Geologica Sinica, 79(2): 165~173 (in Chinese with English abstract).
- Lü Guofang, Guan Baode and Wang Yaoxia. 1993. The characteristics and tectonic setting of the volcanics rocks in the Gaoshanhe/Yunmengshan Formation, western Henan[J]. Henan Geology, 11(1): 37~43 (in Chinese with English abstract).
- Mao Shidong, Chen Yanjing, Zhou Zhenju, *et al.* 2013. U-Pb ages of detrital zircon grains from the Donghe Group in the Southern Qinling Microcontinent: Implications for tectonic evolution[J]. Acta Petrologica Sinica, 29(1): 67~82 (in Chinese with English abstract).
- Nelson J and Gehrels G. 2007. Detrital zircon geochronology and provenance of the southeastern Yukon-Tanana terrane[J]. Canadian Journal of Earth Sciences, 44: 297~316.
- Ni Zhiyong, Chen Yanjing, Li Nuo, *et al.* 2012. Pb-Sr-Nd isotope constraints on the fluid source of the Dahu Au-Mo deposit in Qinling Orogen, Central China, and implication for Triassic tectonic setting [J]. Ore Geology Reviews, 46: 60~67.
- Peng Peng, Zhai Mingguo, Ernst R E, *et al.* 2008. A 1.78 Ga large igneous province in the North China Craton: The Xiong'er Volcanic Province and the North China dyke swarm[J]. Lithos, 101(3~4): 260~280.
- Pei Xianzhi, Meng Yong, Ding Sanping, *et al.* 2007a. Identification of 2.5 Ga detrital zircons from conjoin area between Qilian-Qinling Orogenic belts and its geological implication[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 29(2): 111~116 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Ding Sanping, Zhang Guowei, *et al.* 2007b. Zircon U-Pb ages of the Baihua basic igneous complex in Tianshui area, West Qinling, and their geochemical characteristics[J]. Science in China (Series D), 37(Supp.): 224~234 (in Chinese with English abstract).
- Pei Xianzhi, Ding Sanping, Li Zuoqian, *et al.* 2007c. 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, 81(11): 1150~1156 (in Chinese with English abstract).
- Santosh M. 2010. Assembling North China Craton within the Columbia supercontinent: The role of double-sided subduction[J]. Precambrian Research, 178(1~4): 149~167.
- Sircombe K N. 1999. Tracing provenance through the isotope ages of littoral and sedimentary detrital zircon, eastern Australia[J]. Sedimentary Geology, 124: 47~67.
- Sun Weihua, Zhou Meifu, Gao Jianfeng, *et al.* 2009. Detrital zircon U-Pb geochronological and Lu-Hf isotopic constraints on the Precambrian magmatic and crustal evolution of the western Yangtze Block, SW China[J]. Precambrian Research, 172(1~2): 99~126.
- Sun Weidong, Li Shuguang, Chen Y D, *et al.* 2000. Zircon U-Pb dating of granitoids from South Qinling, central China and their geological significance[J]. Geochimica, 29(3): 209~216 (in Chinese with English abstract).
- Tang Haoshu, Chen Yanjing, Wu Guang, *et al.* 2011. Paleoproterozoic positive $\delta^{13}\text{C}$ carb excursion in the northeastern Sinokorean craton:

- Evidence of the Lomagundi Event[J]. *Gondwana Research*, 19(2): 471 ~ 481.
- Wang Lijuan, Griffin W L, Yu Jinhai, *et al.* 2010. Precambrian crustal evolution of the Yangtze Block tracked by detrital zircons from Neoproterozoic sedimentary rocks[J]. *Precambrian Research*, 177(1 ~ 2): 131 ~ 144.
- Wang Hongliang, He Shiping, Chen Junlu, *et al.* 2006. LA-ICP-MS dating of zircon U-Pb and tectonic significance of Honghuapu subduction-related intrusions in the West segment of Northern Qinling Mountains[J]. *Geoscience*, 20(4): 536 ~ 544 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongliang, Xiao Shaowen, Xu Xueyi, *et al.* 2008. Geochronology and significance of the early Mesoproterozoic tectono-magmatic event in the Western segment of the North Qinling Mountains, China[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(10): 1 728 ~ 1 738 (in Chinese with English abstract).
- Wang Tao, Wang Zongqi, Yan Zhen, *et al.* 2009. Identification of the Ordovician oceanic island basalts and their tectonic significance of the Dabao Formation in southern Qinling: Constraints from geochemistry and geochronology of oceanic island basalt[J]. *Acta Geologica Sinica*, 25(12): 3 241 ~ 3 250 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xiaolei, Jiang Shaoyong, Dai Baozhang, *et al.* 2011. Age, geochemistry and tectonic setting of the Neoproterozoic (ca. 830 Ma) gabbros on the southern margin of the North China Craton[J]. *Precambrian Research*, 190(1 ~ 4): 35 ~ 47.
- Wang Yinchuan, Pei Xianzhi, Li Zuochen, *et al.* 2012. 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*, 31(10): 1 576 ~ 1 587 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shukuan, Pei Xianzhi, Li Zuochen, *et al.* 2012. A study of the material source of Dacotan Group in the northern margin of West Qinling orogenic belt: LA-ICP-MS U-Th-Pb age evidence of detrital zircons[J]. *Geological Bulletin of China*, 31(9): 1 469 ~ 1 481 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Chen Junlu, *et al.* 2010. Detrital record of Neoproterozoic arc-magmatism along the NW margin of the Yangtze Block, China: U-Pb geochronology and petrography of sandstones[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 37(4): 322 ~ 334.
- Yuan Honglin, Gao Shan, Liu Xiaoming, *et al.* 2004. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation-inductively coupled plasma-mass spectrometry[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 28(3): 355 ~ 370.
- Yang Zhihua, Guo Junfeng, Su Shengrui, *et al.* 2002. New advances in the geological study of the Qinling orogen[J]. *Geological of China*, 29(3): 246 ~ 256 (in Chinese with English abstract).
- Yang Li, Chen Fukun, Yang Yizeng, *et al.* 2010. Zircon U-Pb ages of the Qinling Group in Danfeng area: recording mesoproterozoic and neoproterozoic magmatism and early Paleozoic metamorphism in the North Qinling terrain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 26(5): 1 589 ~ 1 603 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, *et al.* 2003. Geochronology of the Bikou Group volcanic rocks: Newest results from SHRIMP zircon U-Pb dating[J]. *Geological Bulletin of China*, 22(6): 456 ~ 458 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Chen Junlu, Wang Zongqi, *et al.* 2007a. The SHRIMP age of Pillow Lava in leucocratic intrusive rocks from Xiaowangjian of the North Qinling: their geological implications and geochemical characteristics[J]. *Science in China (Series D)*, 37(10): 1 301 ~ 1 313 (in Chinese with English abstract).
- Yan Quanren, Wang Zongqi, Yan Zhen, *et al.* 2007b. SHRIMP analyses for ophiolitic-mafic blocks in the Kangxian-Mianxian section of the Mianxian-Lueyang mélange: their geological implications[J]. *Geological Review*, 53(6): 755 ~ 764 (in Chinese with English abstract).
- Yu Zaiping and Cui Haifeng. 2003. Orogeny and orogenic types and process of the Qinling Mountains[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 33(1): 65 ~ 69 (in Chinese with English abstract).
- Zhai Mingguo. 2010. Tectonic evolution and metallogenesis of North China Craton[J]. *Mineral Deposits*, 29(1): 24 ~ 36.
- Zhai Mingguo, Cong Bolin, Guo Jinghui, *et al.* 2000. Sm-Nd geochronology and petrography of garnet pyroxene granulites in the northern Sulu region of China and their geotectonic implication[J]. *Lithos*, 52(1 ~ 4): 23 ~ 33.
- Zhai Mingguo and Liu Wenjun. 2003. Paleoproterozoic tectonic history of the North China craton: a review[J]. *Precambrian Research*, 122(1/4): 183 ~ 199.
- Zhai Mingguo and Peng Peng. 2007. Paleoproterozoic events in the North China Craton[J]. *Acta Geologica Sinica*, 23(11): 2 665 ~ 2 682 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengli, Liu Liang, Zhang Guowei, *et al.* 2004. Determination of neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance[J]. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 33 ~ 42 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Guowei, Meng Qingren, Yu Zaiping, *et al.* 1996. Orogenesis and dynamic of the Qinling Orogen[J]. *Science in China (Series D)*, 26(3): 193 ~ 200 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Guowei, Zhang Benren, Yuan Xuncheng, *et al.* 2001. Qinling orogenic belt and continental dynamics[M]. Bei jing: Science Press, 1~855(in Chinese with English abstract).
- Zhang Shihong, Jiang Ganqing, Dong Jin, *et al.* 2008. New SHRIMP U-Pb age from the Wuqiangxi Formation of Banxi Group: Implications for rifting and stratigraphic erosion associated with the Early Cryogenian(Sturtian) glaciation in South China[J]. Science in China(Series D), 51(11): 1 537~1 544.
- Zhang Yingli and Wang Zongqi. 2011. Provenance analysis of early cretaceous Huixian-Chengxian basin, western Qinling orogenic belt, China: constraints from zircon U-Pb geochronology[J]. Geological Bulletin of China, 30(1): 37~50(in Chinese with English abstract).
- Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan, *et al.* 2001. On the age of metamorphic rocks of the Yudongzi Group and the archaean crystalline basement of the Qinling Orogen[J]. Acta Geologica Sinica, 75(2): 198~204(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun. 2007. When did plate tectonics begin on the north China Craton? Insights from metamorphism[J]. Earth Science Frontiers, 14(1): 19~32.
- Zhao Guochun. 2009. Metamorphic evolution of major tectonic units in the basement of the North China Craton: key issues and discussion [J]. Acta Geologica Sinica, 25(8): 1 772~1 792 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Cawood P A, Wilde S A, *et al.* 2000. Metamorphism of basement rocks in the Central Zone of the North China craton: Implications for Paleoproterozoic tectonic evolution[J]. Precambrian Research, 103(1~2): 55~88.
- Zhao Guochun, Gawood P A, Wilde S A, *et al.* 2002. Review of global 2.1~1.8 Ga orogens: Implications for a pre-Rodinia supercontinent [J]. Earth-Science Reviews, 59(1~4): 125~162.
- Zhao Guochun, Sun Min and Wilde S A. 2002. Reconstruction of a pre-Rodinia supercontinent: new advances and perspectives[J]. Chinese Science Bulletin, 47(18): 1 361~1 364(in Chinese with English abstract).
- Zhao Guochun, Wilde S A, Cawood P A, *et al.* 2001. Archean blocks and their boundaries in the North China craton: Lithological, geochemical, structural and *P-T* path constraints and tectonic evolution [J]. Precambrian Research, 107(1~2): 45~73.
- Zheng Yongfei. 2003. Neoproterozoic magmatic activity and global change [J]. Chinese Science Bulletin, 48(16): 1 639~1 656.
- Zhao Guochun, Sun Min, Wilde S A, *et al.* 2005. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: Key issues revisited[J]. Precambrian Research, 136(2): 177~202.
- Zhou Meifu, Yan Danping, Kennedy A K, *et al.* 2002. SHRIMP U-Pb zircon geochronological and geochemical evidence for Neoproterozoic arc-magmatism along the western margin of the Yangtze Block, South China[J]. Earth and Planetary Science Letters, 19(1~2): 51~67.
- Zhu Xiyun, Chen Fukun, Li Shuangqing, *et al.* 2011. Crustal evolution of the North Qinling terrain of the Qinling Orogen, China: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf isotopic composition[J]. Gondwana Research, 20(1): 194~204.

附中文参考文献

- 陈隽璐, 徐学义, 王洪亮, 等. 2008. 北秦岭西段唐藏石英闪长岩岩体的形成时代及其地质意义[J]. 现代地质, 22(1): 45~52.
- 陈衍景. 1996. 沉积物微量元素示踪地壳成分和环境及其演化的最新进展[J]. 地质地球化学, 12(3): 7~11.
- 陈衍景. 2010. 秦岭印支期构造背景、岩浆活动及成矿作用[J]. 中国地质, 37(4): 854~865.
- 陈衍景, 富士谷. 1992. 豫西金矿成矿规律[M]. 北京: 地震出版社, 1~234.
- 陈衍景, 翟明国, 蒋少涌. 2009. 华北大陆边缘造山过程与成矿研究的重要进展和问题[J]. 岩石学报, 25(11): 2 695~2 762.
- 耿元生, 沈其韩, 任留东. 2010. 华北克拉通晚太古代末—古元古代初的岩浆事件及构造热体系[J]. 岩石学报, 26(7): 1 945~1 966.
- 何艳红, 孙 勇, 陈 亮, 等. 2005. 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, 21(1): 125~134.
- 何世平, 王洪亮, 徐学义, 等. 2007. 北祁连东段红土堡基性火山岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 地球科学进展, 22(2): 143~151.
- 胡 波, 翟明国, 郭敬辉, 等. 2009. 华北克拉通北缘化德群中碎屑锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄及其构造意义[J]. 岩石学报, 25(1): 193~211.
- 胡受奚, 林潜龙, 陈泽铭, 等. 1988. 华北与华南古板块拼合带地质与成矿[M]. 南京: 南京大学出版社, 1~558.
- 李 诺. 2012. 东秦岭燕山期大规模钼金属堆积的过程和机制[D]. 北京: 北京大学(博士学位论文), 1~262.
- 李任伟, 孟庆任, 李双应. 2005. 大别山及邻区侏罗和石炭纪时期盆—山耦合: 来自沉积记录的认识[J]. 岩石学报, 21(4): 1 133~1 143.
- 李王晔. 2008. 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特征—对特提斯洋演化的制约[D]. 中国科学技术大学(博士学位论文), 1~54.
- 李 玮, 董云鹏, 郭安林, 等. 2013. 西秦岭微成盆地沉积充填过程及其对中生代陆内构造演化的制约[J]. 中国科学(D 辑), 43(5): 730~744.

- 林振文, 秦 艳, 周振菊, 等. 2013. 南秦岭勉略带铼厂沟火山岩锆石 U-Pb 年代学及地球化学研究[J]. 岩石学报, 29(1): 83 ~ 94.
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 2006. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义—来自黄陵和汉南侵入杂岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学约束[J]. 岩石学报, 22(2): 387 ~ 396.
- 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 2005. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带[J]. 地质学报, 79(2): 165 ~ 173.
- 陆松年, 杨春亮, 李怀坤, 等. 2002. 华北古大陆与哥伦比亚超大陆[J]. 地学前缘, 9(4): 225 ~ 233.
- 吕国芳, 关保德, 王耀霞. 1993. 豫西高山河组云梦山组火山岩特点及其构造背景[J]. 河南地质, 11(1): 37 ~ 43.
- 毛世东, 陈衍宏, 周振菊, 等. 2013. 南秦岭东河群碎屑锆石 U-Pb 年龄及其板块构造意义[J]. 岩石学报, 29(1): 67 ~ 82.
- 裴先治, 孟 勇, 丁仁平, 等. 2007a. 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, 29(2): 111 ~ 116.
- 裴先治, 丁仁平, 张国伟, 等. 2007b. 西秦岭天水地区百花基性岩浆杂岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及地球化学特征[J]. 中国科学(D 辑), 37(增刊 I): 224 ~ 234.
- 裴先治, 丁仁平, 李佐臣, 等. 2007c. 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, 81(11): 1550 ~ 1561.
- 孙卫东, 李曙光, Chen Y D, 等. 2000. 南秦岭花岗岩锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 地球化学, 29(3): 209 ~ 216.
- 王洪亮, 何世平, 陈隽璐, 等. 2006. 北秦岭西段红花铺俯冲型侵入体 LA-ICP-MS 定年及其地质意义[J]. 现代地质, 20(4): 536 ~ 544.
- 王洪亮, 肖绍文, 徐学义, 等. 2008. 北秦岭西段吕梁期构造岩浆事件的年代学及其构造意义[J]. 地质通报, 27(10): 1728 ~ 1738.
- 王 涛, 王宗起, 闫 臻, 等. 2009. 南秦岭大堡组奥陶纪洋岛玄武岩的识别及其构造意义: 来自地球化学和年代学的证据[J]. 岩石学报, 25(12): 3241 ~ 3250.
- 王银川, 裴先治, 李佐臣, 等. 2012. 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, 31(10): 1576 ~ 1587.
- 吴树宽, 裴先治, 李佐臣, 等. 2012. 西秦岭造山带北缘大草滩群物源研究 LA-ICP-MS 碎屑锆石 U-Pb 年龄证据[J]. 地质通报, 31(9): 1469 ~ 1481.
- 杨 力, 陈福坤, 杨一增, 等. 2010. 丹凤地区秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄: 北秦岭地体中-新元古代岩浆作用和早古生代变质作用记录[J]. 岩石学报, 26(5): 1589 ~ 1603.
- 杨志华, 郭俊峰, 苏生瑞, 等. 2002. 秦岭造山带基础地质研究新进展[J]. 中国地质, 29(3): 246 ~ 256.
- 闫全人, 王宗起, 闫 臻, 等. 2003. 碧口群火山岩的时代-SHRIMP 锆石 U-Pb 测年结果[J]. 地质通报, 22(6): 456 ~ 458.
- 闫全人, 王宗起, 闫 臻, 等. 2007a. 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]. 地质评论, 53(6): 755 ~ 764.
- 闫全人, 陈隽璐, 王宗起, 等. 2007b. 北秦岭小王涧枕状熔岩中淡色侵入体的地球化学特征、SHRIMP 年龄及地质意义[J]. 中国科学(D 辑), 37(10): 1301 ~ 1313.
- 于在平, 崔海峰. 2003. 造山运动与秦岭造山[J]. 西北大学学报(自然科学版), 33(1): 65 ~ 69.
- 张成立, 刘 良, 张国伟, 等. 2004. 北秦岭新元古代后碰撞花岗岩的确定及其构造意义[J]. 地学前缘, 11(3): 33 ~ 42.
- 张国伟, 孟庆任, 于在平, 等. 1996. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. 中国科学(D 辑), 26(3): 193 ~ 200.
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1 ~ 855.
- 张英利, 王宗起. 2011. 西秦岭造山带徽县-成县盆地早白垩世沉积物源分析-锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年代学约束[J]. 地质通报, 30(1): 37 ~ 50.
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 2001. 鱼洞子群变质年龄及秦岭造山带太古宙基底[J]. 地质学报, 75(2): 198 ~ 204.
- 翟明国, 彭 澎. 2007. 华北克拉通古元古代构造事件[J]. 岩石学报, 23(11): 2665 ~ 2682.
- 赵国春. 2009. 华北克拉通基底主要构造单元变质作用演化及其若干问题讨论[J]. 岩石学报, 25(8): 1772 ~ 1792.
- 赵国春, 孙 敏, Wilde S A. 2002. 早-中元古代 Columbia 超级大陆研究进展[J]. 科学通报, 47(18): 1361 ~ 1364.