

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的记录*

杨力^{1,2} 陈福坤^{3**} 杨一增³ 李双庆³ 祝禧艳¹

YANG Li^{1,2}, CHEN FuKun^{3**}, YANG YiZeng³, LI ShuangQing³ and ZHU XiYan¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所 矿产资源研究重点实验室,北京 100029

2. 中国科学院研究生院 地球科学学院,北京 100039

3. 中国科学技术大学地球与空间科学学院 壳幔物质与环境重点实验室,合肥 230026

1. Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. School of Earth Sciences, Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3. CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

2010-01-02 收稿,2010-03-16 改回.

Yang L, Chen FK, Yang YZ, Li SQ and Zhu XY. 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. *Acta Petrologica Sinica*, 26(5):1589–1603

Abstract The Qinling Group is considered as the oldest basement rocks of Precambrian exposed in the North Qinling terrain and records crustal formation and evolution of North Qinling orogenic belt. In this study, zircon U-Pb ages of five gneiss samples collected from Danfeng-Xixia area are reported in order to constrain the time of formation and metamorphism of this rock group and discuss the tectonic provenance of the North Qinling terrain. Analytical results of the zircon dating show that zircon grains of magmatic origin yield ages clustering in about 1400 ~ 1600Ma and about 850 ~ 950Ma, recording two major magmatic activities. Six zircon grains of metamorphic origin with low Th/U ratios of <0.03 give $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ages ranging from 510 Ma to 465 Ma with a weighted mean value of $477 \pm 18\text{Ma}$, recording Early Paleozoic metamorphic overprint. This metamorphism is temporally coincident with the high pressure metamorphism distinguished in both the northern and southern margins of the Qinling terrain, indicating that Qinling Group underwent metamorphism during the North Qinling orogenic process in Early Paleozoic. Qinling Group formed mainly in Late Mesoproterozoic to Early Neoproterozoic and no magmatic events of Paleoproterozoic and Archean were recorded in the basement rocks. In the view of the formation time of the magmatic activities, the North Qinling terrain can be discriminated from the Yangtze block characterized of strong magmatism of Late Neoproterozoic along the northern margin and also from the North China block that is composed of Late Archean to Paleoproterozoic basement rocks along the southern margin. The North Qinling terrain would be a microcontinent with distinguishable evolution in Mesoproterozoic to Neoproterozoic.

Key words Qinling Group; Gneiss; Zircon age; Neoproterozoic; Tectonic provenance

摘要 秦岭岩群被认为是出露于北秦岭地体内最古老的前寒武纪基底岩石,记录了北秦岭造山带的地壳形成和演化历史。本文报道丹凤-西峡地区五件秦岭岩群片麻岩锆石 U-Pb 年龄结果,限定其形成和变质时代,探讨北秦岭地体的构造归属。定年结果表明,岩浆成因锆石颗粒的年龄集中在 1400 ~ 1600Ma 左右和 850 ~ 950Ma 左右,记录两期主要岩浆活动。6 粒锆石具有变质成因特征,低 Th/U 比值 (<0.03), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化在 510 ~ 465Ma 之间,加权平均值 $477 \pm 18\text{Ma}$ 。这一古生代变质叠加时代与北秦岭地体南北缘高压变质作用时代基本一致,说明秦岭岩群遭受到北秦岭造山带俯冲-碰撞造山过程的变质

* 本文受国家重点基础研究发展计划(973)项目(2006CB403505,2009CB825002)和国家自然科学基金项目(40525007)联合资助。

第一作者简介:杨力,男,1983年出生,博士研究生,地球化学专业;E-mail: inzaghiyangli@163.com

** 通讯作者:陈福坤,教授,E-mail: fkchen@ustc.edu.cn

作用。秦岭岩群主要形成于中元古代晚期至新元古代早期,基底岩石缺乏早元古代和太古代岩浆活动的记录。在岩浆作用时代上,北秦岭地体与广泛发育新元古代中-晚期岩浆作用的扬子陆块北缘有差别,也不同于晚太古代-早元古代的华北陆块南缘,可能是中-新元古代形成的独立微陆块。

关键词 秦岭群;片麻岩;锆石年龄;新元古代;构造属性

中图分类号 P597.3

1 引言

秦岭造山带是华北陆块和扬子陆块及其间的微陆块经历了多期拼合而形成的,具有复杂的物质组成和结构构造(如:张国伟等,1988,1995,1996,1997,2001;裴先治等,1999)。根据岩石学和大地构造特征,秦岭地区可以划分出具有不同演化历史和构造属性的南、北秦岭地体或造山带(Meng and Zhang,1999,2000;张国伟等,2001),其中,北秦岭地体以其物质组成的多样性和构造演化的多期性,已成为近年来研究的热点之一。先前的研究认为,秦岭岩群是北秦岭地体内最古老的前寒武纪结晶基底(张国伟等,2001)。二十多年来,不少学者针对秦岭岩群已做过大量的研究并取得了显著的进展(如:张国伟等,1988,2001;游振东等,1991;陆松年等,2006),但是,对于秦岭岩群的形成时代、主变质期时代、北秦岭地体的构造归属等基本问题的认识依然存在着较大的分歧。就秦岭岩群的形成时代而言,主要有三种认识,即:古元古代、中元古代和新元古代(安三元等,1985;游振东等,1991;陈能松等,1991;安三元,1993;Kröner *et al.*,1993;刘国惠等,1993;张宗清等,1994,1996;张宏飞等,1995;裴先治,1997;张国伟等,2001;杨经绥等,2002;陆松年等,2006;时毓等,2009)。对北秦岭地体的构造属性的认识也存在三种不同的观点,即归属于华北陆块(张国伟等,1988,2001;徐贵忠和王艺芬,1990;安三元,1993;张宏飞等,1995;王涛等,1997)、扬子陆块(Huang and Wu,1992;朱炳泉,1993;Xue *et al.*,1996;朱炳泉等,1998;张本仁等,1998;时毓等,2009)、独立于华北陆块和扬子陆块的微陆块,具有不同特征和演化历史(张本仁等,1995,1996;欧阳建平和张本仁,1996;许继锋和韩吟文,1996;许继锋等,1996;董云鹏等,2003)。准确地获取地体内部基底岩石的形成和变质时代的记录,可以为认识和理解北秦岭地体的构造归属乃至整个秦岭造山带的形成与演化过程提供制约。本文运用 LA-ICP-MS 定年技术,分析了秦岭岩群片麻岩的锆石 U-Pb 同位素年龄,结合前人的研究成果,限定秦岭岩群片麻岩原岩的形成时代和变质时期,为探讨北秦岭地体的构造演化和归属问题提供精确的年代学依据。

2 地质背景

秦岭造山带历经长期演化并由多期不同构造复合叠加,形成了北以商丹断裂带分隔北秦岭和南秦岭地块,南以勉略

断裂带分隔南秦岭地块和扬子陆块的构造格局(张国伟等,2001)。在北秦岭地体内(图1),出露的地层由南向北依次为丹凤岩群、秦岭岩群、二郎坪岩群及宽坪岩群。北秦岭的最北端出露宽坪岩群,主要发育有基性火山岩、黑云母大理岩夹变基性火山岩及千枚岩和千枚质砂岩及薄层石英岩的交互层,遭受到绿片岩相至角闪岩相变质作用;丹凤群主要由蛇绿岩和火山-沉积岩组成,经历绿片岩相-低角闪岩相变质作用(张国伟等,2001)。秦岭岩群以成熟度低的陆源碎屑岩和碳酸盐岩沉积建造为主夹有少量火山岩(时毓等,2009)。其北侧发育二郎坪群,岩石类型包括蛇绿岩和火山-沉积岩,变质程度在低绿片岩相-低角闪岩相之间(李亚林等,1998),岩群主体形成于古生代(孙勇等,1996)。东段北缘发育榴辉岩高压变质岩(胡能高等,1994;杨经绥等,2003),而南缘发育高压麻粒岩(刘良等,1996;陈丹玲等,2004)。部分学者认为其形成于活动大陆边缘构造环境,形成时代曾被认为是古元古代(刘国惠等,1993;张国伟等,1995)。南秦岭地体位于商丹断裂带和勉略断裂带之间,主要岩石单元有陡岭岩群,武当岩群及耀岭河岩群等。陡岭岩群主要由变质基性火山岩、基性深成侵入岩、碎屑岩和碳酸盐岩构成,变质程度达到角闪岩相(赵子然等,1995);武当岩群为一套变质火山-沉积岩系,主要由变基性至中性火山岩组成,夹少量变质沉积岩,形成时代为新元古代(凌文黎等,2007;祝禧艳等,2008,2009),受到绿片岩相-高绿片岩相变质作用(张国伟等,2001;张宗清等,2002);耀岭河群主要由变质火山岩组成,以低级变质中基性火山岩为主,夹少量云母石英片岩和砂岩,遭受绿片岩相变质作用改造(李怀坤等,2003)。

秦岭岩群近东西向绵延近千千米,主要呈透镜状块体断续分布(张国伟等,2001),自西向东分别是太白地区、眉县-户县黑河-涝峪地区、长安-柞水县间的丰裕-商县西地区、商县-丹凤-西峡-镇平北部地区和桐柏地区,其中以南阳盆地与商县之间的巨大透镜岩片最具代表性(张国伟等,1988)。研究认为,秦岭岩群普遍遭受多期变质变形和岩浆作用,是一套经受了中-高级变质作用,以角闪岩相为主,原岩以富铝、富炭和富碳酸盐沉积岩为主的表壳岩组合,主要岩石类型有片麻岩、石英片岩、石英岩、斜长角闪岩、钙硅酸盐岩、大理岩、变粒岩等,普遍出现黑云母、石墨、夕线石、石榴子石等变质矿物,岩石变形复杂并发育深熔作用(张国伟等,1988,1995;游振东等,1990)。秦岭岩群分有上下两个构造岩层段:下岩段主要由黑云斜长片麻岩、石墨大理岩夹少量角闪岩和石榴夕线片麻岩组成,原岩主要为陆源碎屑和基性-酸

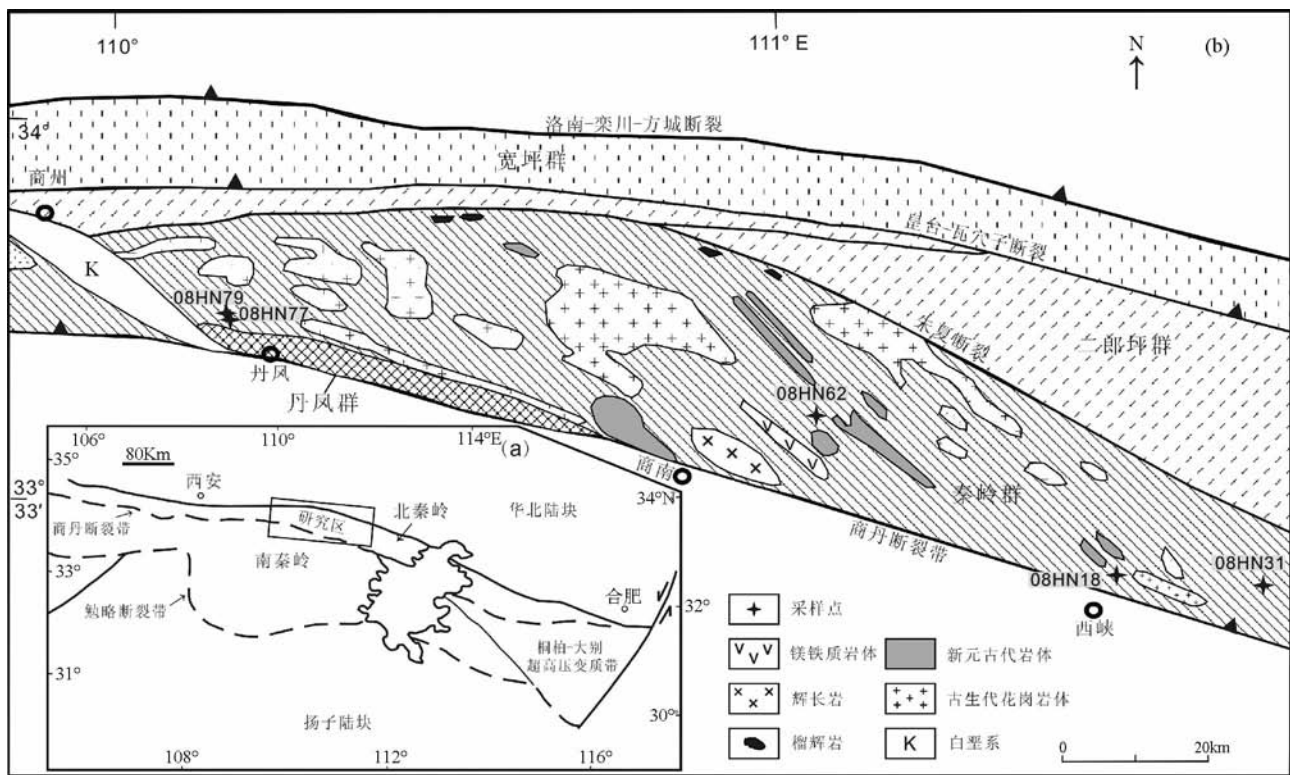


图1 北秦岭造山带地质简图(修改自 Meng and Zhang, 1999; 王涛等, 2002)

Fig. 1 Simplified geological map of North Qinling orogenic belt (modified from Meng and Zhang, 1999; Wang *et al.*, 2002)

性火山岩,西部太白地区以碎屑岩为主(You *et al.*, 1993; 张国伟等, 2001); 上岩段由黑云斜长片麻岩、角闪岩、钙质硅酸盐岩、石榴夕线片麻岩、大理岩、黑云斜长变粒岩和云母石英片岩组成,原岩以陆源碎屑岩为主(Xue *et al.*, 1996; 张国伟等, 2001)。

3 分析方法

岩石粉末样品的主量元素含量测试在中国科学院地质与地球物理研究所岩矿分析实验室完成。将重量为 5g 的 200 目粉末样品熔制成玻璃饼,采用顺序式 X 射线荧光光谱仪 XRF-1500 进行分析,分析精度优于 1%。稀土和微量元素含量测试在中国科学院地质与地球物理研究所微量元素实验室完成,将粉末样品在 Teflon 溶样罐中加酸至完全溶解后转移至 50mL PE 瓶中并加入 1ml 500×10^{-9} In 内标待测,然后用等离子源双聚焦扇形磁式质谱仪 ICP-MS ELEMENT 进行稀土和微量元素测试。

锆石样品在河北省廊坊市科大岩石矿物分选技术服务有限公司采用常规方法破碎后,用常规矿物分选流程进行分选,每个样品分选出的锆石颗粒为 1 千至数千粒不等。再在双目镜下挑选出晶形较好,没有可见矿物包裹体的不同形态和类型的锆石作为测定对象。将锆石颗粒粘在双面胶上,然后用无色透明的环氧树脂固定,待环氧树脂充分固化后,

对其表面进行抛光至锆石内部暴露,然后进行锆石显微(反射光和透射光照相)、阴极发光(CL)显微图象研究及 LA-ICP-MS 分析。锆石阴极发光(CL)显微照相在中国科学院地质与地球物理研究所 Cameca SX51 电子探针仪器上完成,分析电压为 15kV。锆石 U-Pb 定年采用 LA-ICP-MS 分析方法,测试工作在中国科学技术大学中国科学院壳幔物质与环境重点实验室完成。锆石 U-Pb 同位素组成分析采用 91500 国际标准锆石作为外标,元素含量测定采用 NIST SRM610 作为外标, ^{29}Si 作为内标,剥蚀激光束直径 $44\mu\text{m}$ (样品 08HN31 采用 $32\mu\text{m}$)。详细的仪器参数与分析流程参见 Liu *et al.* (2007)。同位素比值和元素含量数据处理采用 Gilliter V4.0 软件计算得到,年龄计算及成图采用 Isoplot 程序(Ludwig, 2003)完成。

4 样品和分析结果

样品 08HN18 为混合岩,采自河南省内乡县夏馆镇西南(采样位置坐标: $\text{N}33^{\circ}22'20''$, $\text{E}111^{\circ}30'33''$),主要矿物组成为石英(20% ~ 25%),长石(40% ~ 45%),黑云母(15% ~ 20%)和石榴石(<10%)。样品 08HN31 为石榴黑云斜长片麻岩(图 2a),采自河南省内乡县夏馆镇以西(采样位置坐标: $\text{N}33^{\circ}22'12''$, $\text{E}111^{\circ}45'34''$),岩石主要由石英(30%),斜长石(30%),黑云母(15%),钾长石(10%),石榴石(<10%)和少量的绿泥石(5%)组成,副矿物有锆石、钛铁矿等。黑云

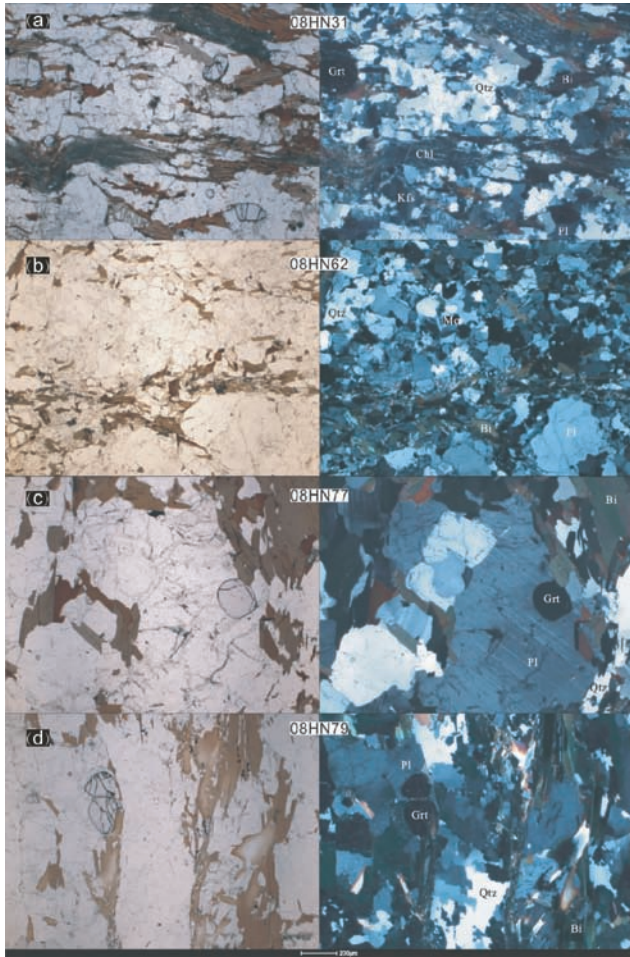


图2 秦岭岩群片麻岩的显微结构特征

Qtz-石英; Kfs-钾长石; Pl-斜长石; Grt-石榴石; Bi-黑云母; Mc-微斜长石; Chl-绿泥石

Fig. 2 Microstructure characteristics of the gneisses from Qinling Group

Qtz-Quartz; Kfs-K-feldspar; Pl-Plagioclase; Grt-Garnet; Bi-Biotite; Mc-Microcline; Chl-Chlorite

母呈强烈定向排列,聚集成条带状,部分退变为绿泥石。样品 08HN62 为黑云二长片麻岩(图 2b),采自河南省卢氏县瓦窑沟乡(采样位置坐标: N33°39'04", E111°02'46"),岩石主要由石英(30%),斜长石(35%),微斜长石(15%),黑云母(15%)和少量石榴石(<5%)组成,副矿物有锆石、钛铁矿等。黑云母呈强烈定向排列,聚集成条带状。样品 08HN77 和 08HN79 均采自陕西省丹凤县渔岭村以南(采样位置坐标:前者 N33°44'06", E110°17'06";后者 N33°44'44", E110°16'54")。前者为黑云斜长片麻岩(图 2c),主要由石英(25%),斜长石(43%),黑云母(22%)和石榴石(<10%)组成,副矿物有锆石、钛铁矿等,黑云母具有一定的定向性。后者为黑云斜长片麻岩(图 2d),矿物拉伸线理和眼球状构造发育,眼球体由压扁拉长的灰白色长石定向组成。主要组成矿物为石英(26%),斜长石(48%),黑云母(18%)和石榴石

(<8%),副矿物有独居石、锆石、钛铁矿等。

考虑到混合岩样品 08HN18 受风化作用的影响,只分析了其余 4 件片麻岩样品的地球化学组成(表 1);全部 5 件片麻岩的锆石单矿物样品采用 LA-ICP-MS 分析方法进行 U-Pb 定年测试(表 2)。

表 1 秦岭岩群片麻岩的主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)组成

Table 1 Major (wt %) and trace ($\times 10^{-6}$) element contents of the gneisses from Qinling Group

样品号	08HN31	08HN62	08HN77	08HN79
SiO ₂	73.54	73.15	67.72	69.09
TiO ₂	0.73	0.30	0.82	0.86
Al ₂ O ₃	12.42	13.50	14.57	13.40
Fe ₂ O ₃	5.42	2.85	6.09	6.90
MnO	0.11	0.05	0.06	0.11
MgO	1.35	0.61	1.71	1.41
CaO	0.48	1.64	2.70	1.99
Na ₂ O	0.41	3.78	2.68	2.73
K ₂ O	2.98	2.74	3.11	2.54
P ₂ O ₅	0.04	0.12	0.15	0.07
LOI	2.54	0.74	0.48	0.50
Total	100.0	99.48	100.1	99.60
A/CNK	2.60	1.11	1.15	1.23
Li	71.12	18.92	16.50	28.59
Be	1.12	2.57	0.98	1.46
Sc	16.04	7.09	16.66	17.09
V	76.8	28.2	65.4	55.4
Cr	211	150	195	224
Co	14.16	6.37	14.97	13.80
Ni	24.25	9.04	79.14	18.12
Cu	14.68	12.79	54.42	18.51
Zn	71.55	53.84	82.37	84.93
Ga	16.89	16.75	20.23	19.18
Rb	130	150	138	157
Sr	53.0	88.6	199	114
Y	32.37	20.33	35.17	48.31
Zr	356	127	309	366
Nb	14.43	9.83	13.71	14.54
Cs	7.08	9.26	3.38	4.80
Ba	694	434	595	531
La	45.78	18.25	49.34	79.34
Ce	93.26	36.78	101.6	149.7
Pr	11.36	4.55	11.79	17.97
Nd	42.81	16.71	46.84	68.79
Sm	7.72	3.31	8.38	12.34
Eu	1.34	0.69	1.41	1.51
Gd	6.98	3.06	7.61	10.92
Tb	1.05	0.56	1.25	1.63
Dy	6.27	3.63	6.79	9.12
Ho	1.33	0.80	1.36	1.88
Er	3.69	2.22	3.46	5.09
Tm	0.57	0.34	0.49	0.80
Yb	3.83	2.23	2.91	5.15
Lu	0.59	0.34	0.46	0.81
Hf	10.12	4.09	9.39	10.38
Ta	1.13	1.34	0.88	0.87
Pb	15.70	25.97	23.93	20.95
Th	18.76	14.84	21.48	30.12
U	2.77	1.37	2.52	2.21
(La/Yb) _N	8.6	5.89	12.2	11.0

表 2 秦岭岩群片麻岩锆石 LA-ICP-MS U-Pb 同位素分析数据

Table 2 Zircon LA-ICP-MS U-Pb analyzed results of the gneisses from Qinling Group

样品 测点	Pb* ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	原子比值			表面年龄 (Ma)		
				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
08HN18 混合岩									
01	101	326	0.50	0.2364 ± 54	3.10 ± 12	0.0958 ± 29	1368	1434	1545
02	114	351	0.57	0.2560 ± 16	3.15 ± 11	0.0894 ± 29	1469	1446	1412
03	39	190	0.95	0.1528 ± 25	1.469 ± 65	0.0696 ± 32	916	918	918
04	356	2367	0.48	0.1417 ± 9	1.384 ± 47	0.0709 ± 23	854	882	954
05	80	442	0.25	0.1646 ± 12	1.716 ± 58	0.0758 ± 24	982	1015	1090
06	163	895	0.15	0.1655 ± 9	1.680 ± 56	0.0736 ± 23	987	1001	1030
07	176	980	0.55	0.1496 ± 12	1.532 ± 53	0.0742 ± 24	898	943	1046
08	70	401	0.53	0.1321 ± 9	1.248 ± 53	0.0685 ± 29	800	823	884
09	101	550	0.76	0.1409 ± 12	1.368 ± 53	0.0707 ± 27	850	875	948
10	142	860	0.11	0.1478 ± 13	1.372 ± 54	0.0674 ± 27	889	877	851
11	161	813	0.43	0.1653 ± 9	1.581 ± 53	0.0695 ± 23	986	963	913
12	181	992	0.13	0.1637 ± 9	1.645 ± 53	0.0729 ± 23	977	988	1012
13	273	1419	0.44	0.1617 ± 18	1.537 ± 53	0.0689 ± 22	966	945	896
14	109	541	0.71	0.1553 ± 15	1.535 ± 55	0.0719 ± 24	931	944	983
15	165	999	0.15	0.1478 ± 14	1.462 ± 53	0.0717 ± 23	888	915	976
16	171	1069	0.11	0.1476 ± 11	1.444 ± 48	0.0710 ± 23	887	907	958
17	114	337	0.45	0.328 ± 2	4.92 ± 16	0.1088 ± 34	1829	1806	1780
18	675	3720	0.81	0.1381 ± 8	1.296 ± 40	0.0681 ± 20	834	844	871
19	162	854	0.43	0.1599 ± 15	1.529 ± 50	0.0694 ± 22	956	942	909
20	138	771	0.20	0.1617 ± 17	1.513 ± 59	0.0679 ± 29	966	935	864
21	124	712	0.20	0.1594 ± 16	1.483 ± 53	0.0675 ± 23	953	923	853
22	383	2730	0.34	0.1255 ± 12	1.239 ± 39	0.0716 ± 21	762	818	975
23	124	685	0.19	0.1544 ± 12	1.557 ± 51	0.0732 ± 24	925	953	1019
24	153	827	0.49	0.1527 ± 11	1.429 ± 49	0.0679 ± 22	916	901	866
25	49	266	0.44	0.1601 ± 12	1.473 ± 55	0.0667 ± 23	958	919	829
08HN31 黑云斜长片麻岩									
01	432	2728	0.37	0.1753 ± 14	2.023 ± 123	0.0850 ± 73	1041	1123	1315
02	156	142	0.58	0.4897 ± 53	10.76 ± 67	0.1615 ± 143	2569	2503	2472
03	159	509	0.23	0.2736 ± 42	3.632 ± 226	0.0978 ± 84	1559	1557	1582
04	229	1047	0.51	0.1685 ± 23	1.850 ± 114	0.0809 ± 69	1004	1064	1219
05	429	1186	0.38	0.2735 ± 40	3.844 ± 240	0.1037 ± 88	1559	1602	1691
06	533	1741	0.65	0.2076 ± 30	2.308 ± 148	0.0819 ± 71	1216	1215	1244
07	165	700	0.65	0.1839 ± 26	2.166 ± 140	0.0866 ± 75	1088	1170	1352
08	96	261	0.74	0.2701 ± 61	3.545 ± 266	0.0984 ± 99	1541	1537	1595
09	260	935	0.47	0.2300 ± 26	2.60 ± 16	0.0834 ± 72	1334	1301	1279
10	104	292	0.22	0.2826 ± 26	4.255 ± 258	0.1108 ± 95	1605	1685	1813
11	217	624	0.35	0.2731 ± 36	3.658 ± 223	0.0994 ± 85	1556	1562	1612
12	164	433	0.65	0.2774 ± 38	3.725 ± 235	0.0995 ± 87	1578	1577	1615
13	70	176	1.10	0.2740 ± 67	3.589 ± 244	0.0962 ± 85	1561	1547	1552
14	153	349	1.14	0.2753 ± 58	3.993 ± 261	0.1067 ± 92	1567	1633	1744
15	514	1690	0.64	0.2272 ± 20	2.651 ± 160	0.0861 ± 73	1320	1315	1340
16	133	454	0.63	0.2197 ± 32	2.341 ± 167	0.0786 ± 73	1280	1225	1161
17	127	302	1.28	0.2910 ± 54	4.088 ± 263	0.1031 ± 92	1647	1652	1681
18	424	1191	0.49	0.2729 ± 27	3.541 ± 214	0.0958 ± 82	1555	1536	1544
19	192	617	0.73	0.2220 ± 24	2.702 ± 168	0.0897 ± 78	1292	1329	1419
20	305	1182	0.42	0.2167 ± 18	2.990 ± 181	0.1017 ± 87	1264	1405	1655
21	66	164	0.85	0.2638 ± 39	3.613 ± 233	0.1018 ± 91	1509	1552	1657
22	193	488	0.48	0.2723 ± 56	3.553 ± 225	0.0964 ± 82	1552	1539	1555
23	174	686	0.12	0.2104 ± 20	2.640 ± 161	0.0926 ± 79	1231	1312	1480
24	165	528	1.48	0.1949 ± 29	2.273 ± 156	0.0855 ± 76	1148	1204	1327

续表 2

Continued Table 2

样品 测点	Pb* ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	原子比值			表面年龄 (Ma)		
				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
25	56	325	0.32	0.1434 \pm 19	1.366 \pm 96	0.0708 \pm 66	864	874	951
08HN62 黑云斜长片麻岩									
01	92	334	0.66	0.2153 \pm 33	2.580 \pm 118	0.0860 \pm 32	1257	1295	1338
02	286	1621	0.36	0.1596 \pm 18	1.690 \pm 78	0.0759 \pm 28	954	1005	1093
03	102	503	0.59	0.1607 \pm 14	1.680 \pm 72	0.0750 \pm 27	961	1001	1067
04	107	556	0.67	0.1607 \pm 14	1.515 \pm 69	0.0676 \pm 27	961	937	856
05	93	435	0.76	0.1602 \pm 15	1.872 \pm 137	0.0834 \pm 55	958	1071	1279
06	137	638	0.39	0.1758 \pm 18	1.975 \pm 90	0.0807 \pm 31	1044	1107	1213
07	228	1635	0.23	0.1217 \pm 22	1.202 \pm 86	0.0707 \pm 41	740	802	948
08	275	1769	0.23	0.1603 \pm 15	1.691 \pm 70	0.0755 \pm 25	958	1005	1083
09	114	564	0.90	0.1699 \pm 19	2.154 \pm 111	0.0911 \pm 39	1011	1166	1448
10	135	654	0.43	0.1717 \pm 17	1.822 \pm 115	0.0760 \pm 41	1021	1053	1096
11	255	1333	0.47	0.1988 \pm 15	2.699 \pm 128	0.0973 \pm 41	1169	1328	1574
12	121	606	0.58	0.1609 \pm 14	1.540 \pm 77	0.0688 \pm 31	962	946	894
13	122	646	0.77	0.1606 \pm 14	1.560 \pm 66	0.0695 \pm 25	960	954	914
14	297	1370	0.97	0.1606 \pm 11	1.521 \pm 65	0.0679 \pm 24	960	939	865
15	191	1190	0.88	0.1439 \pm 28	1.562 \pm 124	0.0781 \pm 62	867	955	1149
16	285	881	0.36	0.2766 \pm 22	3.968 \pm 170	0.1030 \pm 36	1574	1628	1679
17	96	479	0.53	0.1607 \pm 15	1.636 \pm 69	0.0730 \pm 26	960	984	1014
18	191	1054	0.21	0.1603 \pm 16	1.549 \pm 65	0.0694 \pm 26	959	950	912
19	155	703	0.66	0.1523 \pm 17	1.543 \pm 74	0.0726 \pm 29	914	948	1002
20	89	177	2.04	0.2782 \pm 26	4.073 \pm 173	0.1074 \pm 38	1582	1649	1756
21	180	1155	0.39	0.1601 \pm 16	1.553 \pm 72	0.0697 \pm 28	957	952	919
22	92	618	1.35	0.1108 \pm 16	1.232 \pm 58	0.0795 \pm 31	677	815	1185
23	168	792	0.70	0.1609 \pm 22	1.831 \pm 89	0.0818 \pm 36	962	1057	1240
24	212	1045	0.70	0.1603 \pm 11	1.604 \pm 71	0.0717 \pm 27	959	972	977
25	218	1156	0.30	0.1605 \pm 10	1.560 \pm 64	0.0698 \pm 24	960	954	923
08HN77 黑云斜长片麻岩									
01	302	1069	0.42	0.2424 \pm 63	3.009 \pm 243	0.0900 \pm 58	1399	1410	1426
02	303	1170	0.38	0.2475 \pm 71	3.049 \pm 284	0.0900 \pm 68	1426	1420	1426
03	224	2685	0.09	0.0823 \pm 21	0.6577 \pm 538	0.0581 \pm 38	510	513	532
04	93	675	0.33	0.1194 \pm 32	1.117 \pm 91	0.0681 \pm 45	727	762	870
05	69	241	0.43	0.2477 \pm 74	2.930 \pm 259	0.0857 \pm 67	1427	1390	1332
06	79	566	0.24	0.1774 \pm 48	2.003 \pm 163	0.0820 \pm 55	1053	1117	1246
07	152	504	0.41	0.2495 \pm 37	3.065 \pm 235	0.0888 \pm 60	1436	1424	1399
08	170	1081	0.50	0.2457 \pm 67	2.955 \pm 242	0.0873 \pm 59	1416	1396	1366
09	188	1120	0.61	0.1301 \pm 34	1.250 \pm 104	0.0698 \pm 47	789	824	922
10	139	552	0.26	0.1620 \pm 47	1.695 \pm 146	0.0760 \pm 57	968	1007	1096
11	208	582	1.11	0.2480 \pm 71	3.087 \pm 256	0.0902 \pm 59	1428	1430	1430
12	177	689	0.53	0.2041 \pm 55	2.452 \pm 198	0.0871 \pm 56	1198	1258	1364
13	285	869	0.74	0.2427 \pm 64	3.097 \pm 247	0.0926 \pm 59	1401	1432	1479
14	185	989	0.45	0.1610 \pm 44	1.571 \pm 127	0.0709 \pm 46	962	959	954
15	149	961	0.08	0.1472 \pm 43	1.485 \pm 124	0.0730 \pm 49	885	924	1014
16	110	715	0.14	0.1381 \pm 40	1.376 \pm 123	0.0725 \pm 57	834	879	1000
17	87	454	0.46	0.1613 \pm 43	1.577 \pm 129	0.0710 \pm 47	964	961	957
18	235	990	0.36	0.1917 \pm 51	2.376 \pm 188	0.0899 \pm 57	1131	1235	1424
19	117	366	0.47	0.2467 \pm 70	3.102 \pm 254	0.0913 \pm 60	1421	1433	1453
20	154	843	0.38	0.1588 \pm 42	1.587 \pm 133	0.0726 \pm 50	950	965	1003
21	130	148	2.17	0.4932 \pm 134	11.86 \pm 96	0.1747 \pm 114	2584	2593	2603
22	79	636	0.20	0.1110 \pm 34	1.056 \pm 96	0.0694 \pm 53	679	732	910

续表 2

Continued Table 2

样品 测点	Pb* ($\times 10^{-6}$)	U ($\times 10^{-6}$)	Th/U	原子比值			表面年龄 (Ma)		
				$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$	$\frac{^{206}\text{Pb}}{^{238}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{235}\text{U}}$	$\frac{^{207}\text{Pb}}{^{206}\text{Pb}}$
23	70	267	0.98	0.2007 \pm 57	2.432 \pm 210	0.0876 \pm 60	1179	1252	1373
24	66	211	0.49	0.2459 \pm 72	3.081 \pm 258	0.0921 \pm 67	1417	1428	1470
25	129	426	0.62	0.2470 \pm 69	2.933 \pm 244	0.0858 \pm 57	1423	1391	1333
08HN79 黑云斜长片麻岩									
01	40	321	0.43	0.1174 \pm 24	1.109 \pm 69	0.0685 \pm 47	716	758	884
02	36	257	0.39	0.1387 \pm 23	1.352 \pm 89	0.0706 \pm 49	838	868	945
03	115	630	0.42	0.1595 \pm 13	1.750 \pm 81	0.0794 \pm 38	954	1027	1183
04	65	486	0.18	0.1407 \pm 17	1.346 \pm 66	0.0692 \pm 33	849	866	904
05	58	403	0.12	0.1589 \pm 13	1.517 \pm 75	0.0698 \pm 36	951	937	924
06	63	449	0.25	0.1444 \pm 11	1.389 \pm 64	0.0698 \pm 33	869	884	923
07	88	1303	0.03	0.0747 \pm 6	0.5757 \pm 301	0.0557 \pm 30	465	462	441
08	42	291	0.23	0.1446 \pm 14	1.389 \pm 70	0.0696 \pm 37	871	884	917
09	81	1250	0.02	0.0754 \pm 6	0.6004 \pm 297	0.0576 \pm 29	469	477	514
10	40	317	0.20	0.1364 \pm 29	1.300 \pm 93	0.0691 \pm 46	824	846	902
11	37	261	0.10	0.1584 \pm 16	1.739 \pm 97	0.0799 \pm 45	948	1023	1195
12	92	1427	0.03	0.0767 \pm 11	0.6067 \pm 393	0.0569 \pm 37	477	481	487
13	54	395	0.19	0.1403 \pm 17	1.382 \pm 74	0.0711 \pm 38	846	881	959
14	60	444	0.13	0.1408 \pm 11	1.340 \pm 62	0.0687 \pm 33	849	863	890
15	50	330	0.17	0.1587 \pm 13	1.517 \pm 72	0.0693 \pm 34	949	937	908
16	22	112	1.01	0.1585 \pm 18	1.484 \pm 79	0.0681 \pm 37	949	924	872
17	93	1307	0.02	0.0753 \pm 7	0.6140 \pm 307	0.0590 \pm 31	468	486	568
18	47	323	0.08	0.1585 \pm 15	1.477 \pm 72	0.0676 \pm 34	949	921	858
19	70	490	0.08	0.1581 \pm 20	1.554 \pm 82	0.0712 \pm 40	946	952	963
20	45	294	0.33	0.1589 \pm 23	1.404 \pm 66	0.0640 \pm 33	951	891	741
21	40	308	0.16	0.1401 \pm 14	1.359 \pm 66	0.0702 \pm 35	845	871	933
22	23	117	0.74	0.1608 \pm 29	1.574 \pm 107	0.0708 \pm 46	961	960	950
23	54	357	0.16	0.1590 \pm 13	1.543 \pm 76	0.0700 \pm 35	951	948	927
24	54	428	0.44	0.1128 \pm 12	1.004 \pm 50	0.0644 \pm 31	689	706	755
25	90	1274	0.03	0.0778 \pm 5	0.6091 \pm 281	0.0567 \pm 27	483	483	480

Pb* 表示放射性成因铅的含量

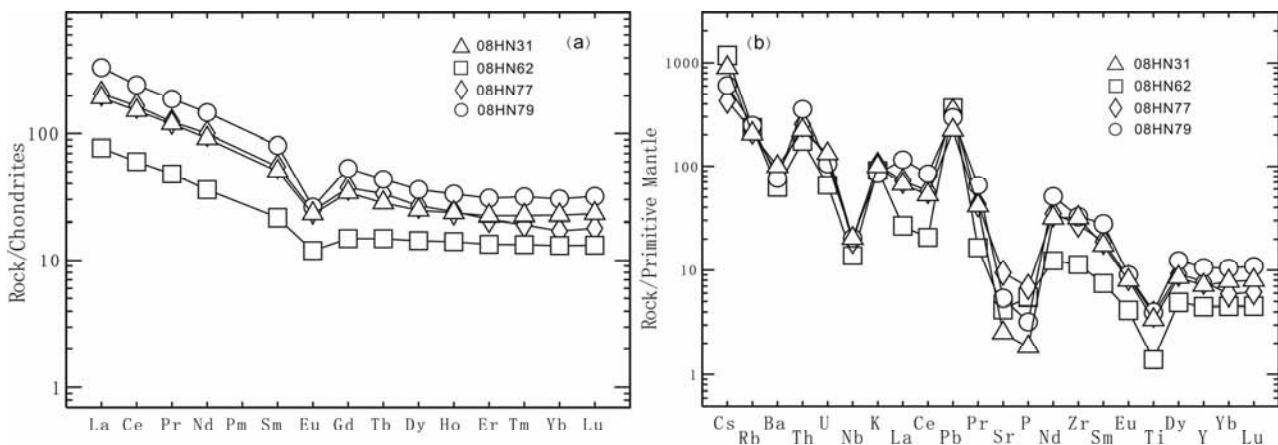


图3 秦岭岩群片麻岩稀土元素球粒陨石标准化配分图和微量元素地幔标准化蛛网图(球粒陨石标准化值引自 Taylor and McLennan,1985;地幔标准化值引自 Sun and McDonough,1989)

Fig.3 Chondrite normalized REE patterns and primitive-mantle normalized trace element patterns of gneisses from Qinling Group (Chondrite data from Taylor and McLennan, 1985; Primitive-mantle data from Sun and McDonough, 1989)

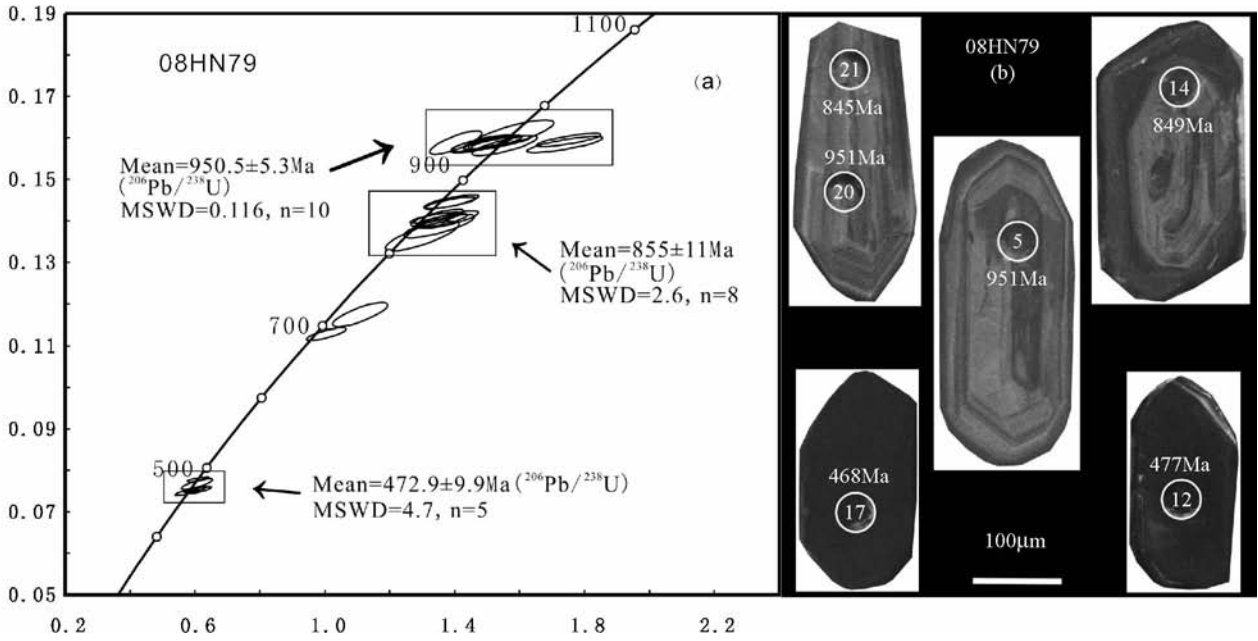


图4 片麻岩样品(08HN79)的锆石 U-Pb 年龄和代表性锆石阴极发光 (CL) 图像

圆圈为 U-Pb 分析点

Fig.4 Zircon and U-Pb ages and cathodoluminescence (CL) images of typical grains from the gneiss sample (08HN79)

Circles are referred to the dating spots

样品 08HN31 的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 73.54% 和 12.42%, 具有低的全碱含量 (3.39%)。样品 08HN62 的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 73.15% 和 13.50%, 全碱含量为 6.52%。样品 08HN77 的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 67.72% 和 14.57%, 全碱含量为 5.79%。样品 08HN79 的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 69.09% 和 13.40%, 全碱含量为 5.27%。4 件样品的铝饱和指数介于 1.11 ~ 2.60 之间, 属于过铝质系列岩石。样品 08HN31 和 08HN77 的 REE 总量分别为 227×10^{-6} 和 244×10^{-6} , 样品 08HN62 的 REE 总量较低为 94×10^{-6} , 而样品 08HN79 的 REE 总量较高为 365×10^{-6} 。在稀土元素球粒陨石标准化配分图上, 4 件样品的特征大致相同, 均显示轻稀土元素富集, 重稀土元素相对亏损 (图 3a), $(\text{La}/\text{Yb})_n$ 值变化在 5.9 至 12.0 之间, 均有 Eu 负异常特征。在原始地幔标准化蛛网图上, 4 件样品均相对富集 K、Rb、Th、U 等大离子亲石元素和 Zr 等高场强元素, 而相对亏损 Nb、Ti、P 等高场强元素, Cs、Th、Pb 元素显示明显的正异常 (图 3b)。

黑云斜长片麻岩 08HN79: 锆石颗粒无色透明, 晶形较好, 大多数呈自形长柱状、半截锥状, 少数颗粒呈浑圆状。颗粒粒度多为 80 ~ 200 μm , 柱状晶体长宽比为 2 : 1 ~ 3 : 1, 有的可达 5 : 1 (图 4b)。根据 25 个分析点的测试结果, 可将样品的年龄大致分为 3 组 (图 4a)。第一组 10 颗锆石的韵律环带发育 (图 4b), 其谐和性较好, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为 948 ~ 961 Ma, 加权平均年龄为 950.5 ± 5.3 Ma, 锆石 U 含量变化范围为 112×10^{-6} ~ 630×10^{-6} , Th 含量变化范围为 22×10^{-6} ~ 262×10^{-6} , 锆石的 Th/U 比值介于 0.10 ~ 1.01 之间。岩

浆成因的锆石 Th/U 比值通常较大 (>0.1) 且发育韵律环带的内部结构 (如: Rubatto, 2002; Belousova *et al.*, 2002; Bingen *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2005), 因此, 这组锆石应为岩浆成因, 代表了新元古代早期的岩浆作用。第二组 10 颗锆石 CL 图像显示的形态和结构与前一组锆石基本相同 (图 4b), 其中 8 个分析点的谐和性较好, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 824 ~ 871 Ma 之间, 加权平均年龄为 855 ± 11 Ma, 锆石 U 含量变化范围为 257×10^{-6} ~ 486×10^{-6} , Th 含量变化范围为 48×10^{-6} ~ 112×10^{-6} , 锆石的 Th/U 比值介于 0.13 ~ 0.39 之间。另外两个分析点略偏离谐和线, 显示一定的 Pb 丢失, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值分别为 689 Ma 和 716 Ma, Th/U 比值分别为 0.43 和 0.44, 表明了它们都是岩浆成因锆石, 指示了新元古代中期的岩浆活动。多期的锆石年龄暗示岩石的物源复杂。第三组年龄有 5 个分析点, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄介于 465 ~ 483 Ma, 加权平均年龄为 472.9 ± 9.9 Ma。锆石 U 含量相对较高, 变化范围为 1250×10^{-6} ~ 1427×10^{-6} , 而 Th 含量较低, 变化范围为 22×10^{-6} ~ 40×10^{-6} , 从锆石的 CL 图像上也可反映出它们具有高 U 的特点, 即弱 CL 强度, 表面黑暗, 内部结构不清楚 (图 4b), Th/U 比值很低, 介于 0.02 ~ 0.03 之间, 具有变质成因锆石的特征。

黑云斜长片麻岩 08HN77: 锆石颗粒无色透明, 以自形、长柱状为主, 颗粒粒度多为 100 ~ 150 μm , 长宽比为 2 : 1 ~ 3 : 1 (图 5)。根据锆石 CL 图像和年龄结果 (图 5、图 6a), 也可将样品中的锆石分为 3 组。第一组锆石发育核幔结构, 核部发亮, 边部为浅灰色, 发育韵律环带 (图 5)。由于激光束

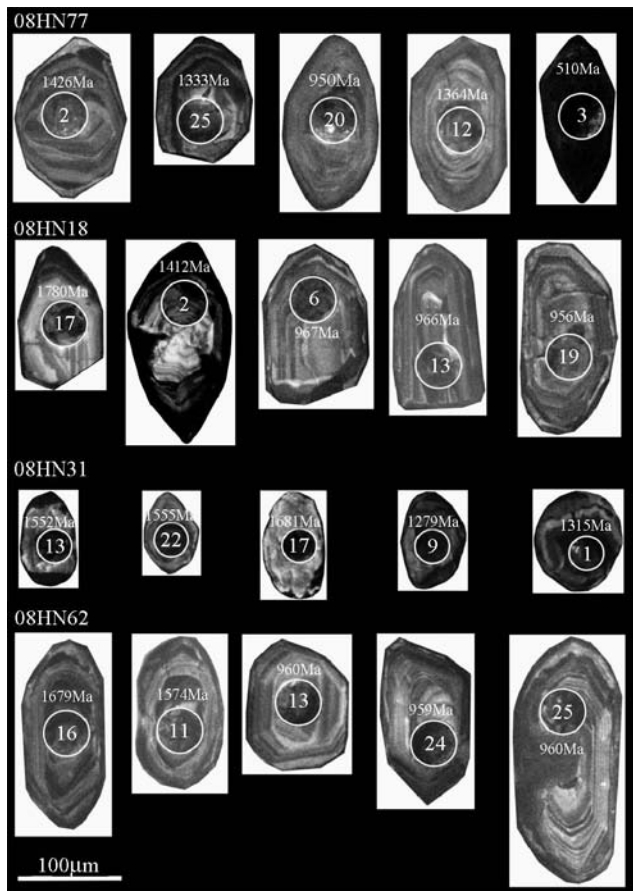


图5 秦岭岩群4个片麻岩样品的代表性锆石 CL 图像
圆圈为 U-Pb 分析点

Fig. 5 CL images of typical zircon grains of four gneiss samples from Qinling Group

Circles are referred to the dating spots

斑较大,因此只对其核部进行了11次分析。其中,只有一颗锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为2603 Ma,记录的是晚太古代的年龄信息。而另外10个分析点的年龄较为集中且谐和,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为1332~1479Ma,加权平均年龄为1414 \pm 73Ma,锆石U含量变化范围为 211×10^{-6} ~ 1170×10^{-6} ,Th含量变化范围为 103×10^{-6} ~ 645×10^{-6} ,锆石的Th/U比值介于0.38~1.11之间,显示了岩浆成因的特点。因此,这组碎屑锆石应为岩浆成因,记录了中元古代早期的岩浆物质来源。第二组锆石发育明显的岩浆韵律环带(图5),13个分析点略偏离谐和线,显示一定的Pb丢失,且 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值跨度较大,从679Ma到1198Ma,主要集中在新元古代。锆石U含量变化范围为 267×10^{-6} ~ 1120×10^{-6} ,Th含量变化范围为 76×10^{-6} ~ 678×10^{-6} ,除了08HN77-15分析点的Th/U比值为0.08偏小以及08HN77-21分析点Th/U比值为2.17偏大外,大部分锆石的Th/U比值介于0.14~0.98之间,表明了岩浆成因锆石的特征。第三组只有一颗锆石,其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为510Ma,锆石U含量值较高为2685 \times

10^{-6} ,Th含量值为 232×10^{-6} ,Th/U比值较低为0.09,可能为变质成因。

混合岩08HN18:锆石颗粒呈浅黄色,以自形、长柱状为主,颗粒粒度多为82~120 μm ,长宽比为2:1~3:1(图5)。根据锆石CL图像,可见韵律环带和核幔发育的内部结构特征。核部晶区的分析结果显示,岩浆成因锆石的年龄主要集中在新元古代,其中9个分析点给出相对谐和集中的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值(图6b),介于953~987Ma,加权平均年龄为975.4 \pm 9.8Ma。其他分析点在U-Pb谐和图上略偏离谐和线,说明发生一定程度的Pb丢失。有三个分析点的年龄为中元古代,其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值分别为1412Ma,1545Ma和1780Ma,Th/U比值均大于0.4。

石榴黑云斜长片麻岩08HN31:锆石颗粒无色透明,以半自形-他形、短柱状-浑圆状为主,大部分锆石不具完整晶形,颗粒粒度较小,为60~80 μm 。阴极发光CL图像显示,部分锆石内部结构不清晰,但是仍然可见中间较亮、边部较暗的核幔结构,且发育较宽的韵律环带(图5)。锆石核部12个分析点的年龄结果在谐和线上较谐和且集中(图6c),其 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为1544~1813Ma,加权平均年龄为1637 \pm 54Ma,锆石U含量变化范围为 164×10^{-6} ~ 1191×10^{-6} ,Th含量变化范围为 64×10^{-6} ~ 586×10^{-6} ,锆石的Th/U比值变化大,介于0.22~1.28之间,记录了中元古代早期的岩浆作用。有一颗锆石的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄值为2472Ma,记录的是古元古代早期至新太古代的年龄信息。另一组11颗岩浆锆石的年龄主要为中元古代, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 加权平均年龄为1350 \pm 92Ma,绝大多数锆石的Th/U比值大于0.4。

黑云二长片麻岩08HN62:锆石颗粒呈无色-浅黄色透明,以自形、长柱状为主,颗粒粒度为100~150 μm 。根据锆石CL图像(图5),锆石内部结构与其它样品相似,即核幔结构发育,具有明显的韵律环带。对锆石核部分析显示(图6d),年龄主要为中元古代,但较为分散不集中且谐和性不好,Th/U比值均大于0.36,应为岩浆成因锆石。18颗具有简单内部结构的锆石的年龄集中于新元古代,大多数是谐和的,其中14个分析点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值为954~962Ma,加权平均年龄为959.5 \pm 3.9Ma,锆石U、Th含量较高,分别为 435×10^{-6} ~ 1769×10^{-6} 和 223×10^{-6} ~ 1330×10^{-6} ,Th/U比值介于0.21~0.97之间,代表了新元古代时期的岩浆活动。

5 讨论

造山带内部的基底岩石不仅可以记录造山过程,也是揭示早期地壳演化和探讨地体归属的主要载体。不同地质体可能经历不同的地壳演化历史,包括不同的沉积环境和古生物特征、不同时期的变质作用和岩浆作用等信息。北秦岭地体的构造归属是认识秦岭造山带演化的重要问题之一,历来是这一地区的研究重点。尽管前人已开展大量的研究并取得丰硕的研究成果,不同的认识依然存在,代表性的观点有:

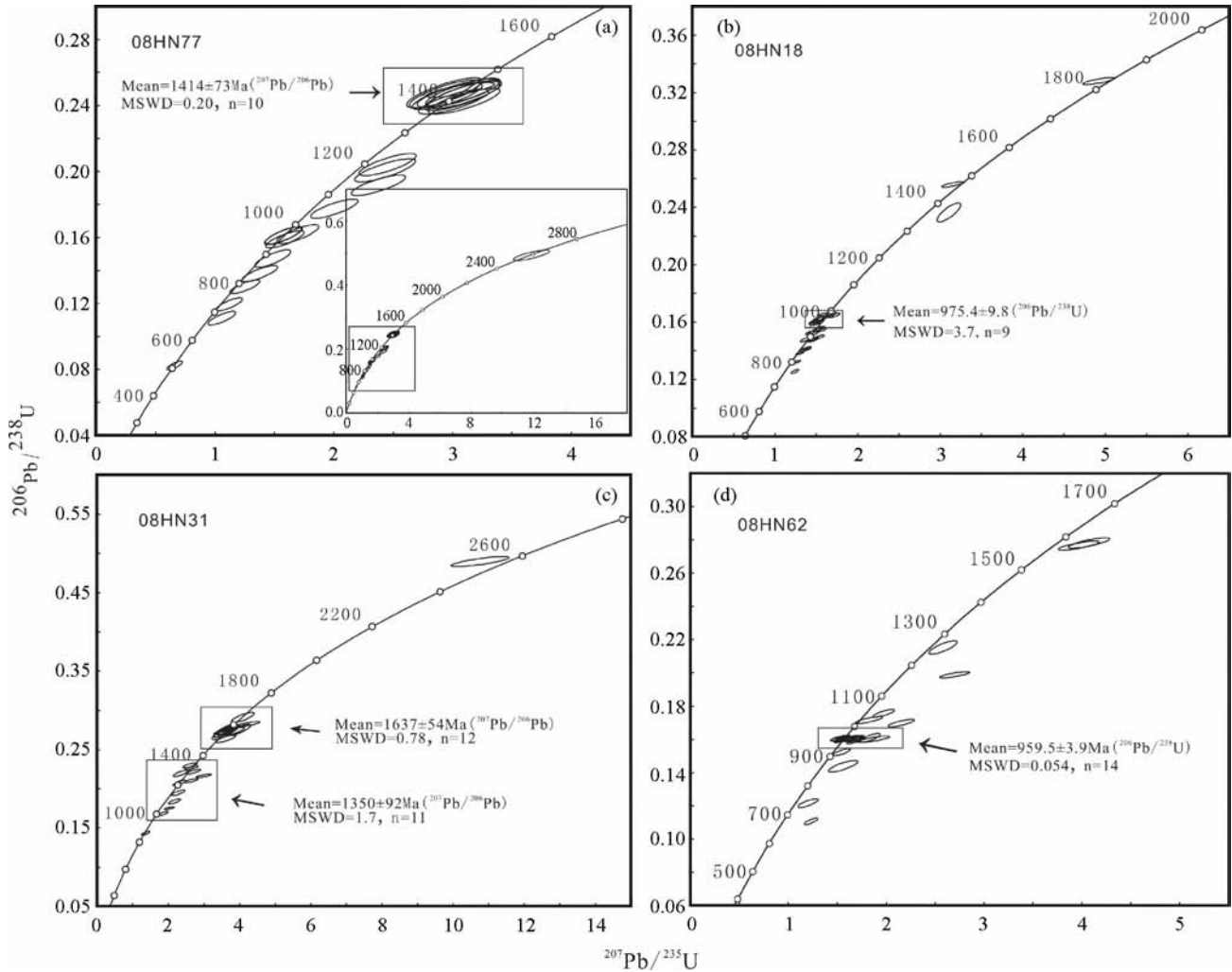


图6 秦岭岩群4个片麻岩样品的锆石 U-Pb 年龄

Fig.6 Zircon U-Pb ages of four gneiss samples from Qinling Group

华北陆块属性、扬子陆块属性和独立微陆块。

张国伟等(1988,2001)根据北秦岭中存在具有岛弧性质的变质火山-沉积岩和岩浆岩,以及出露于商丹断裂带的新元古代蛇绿岩,认为北秦岭地体在新元古代-早古生代期间是华北陆块南缘的活动大陆边缘;徐贵忠和王艺芬(1990)对比北秦岭地体的秦岭岩群和华北陆块南缘的太华群杂岩,认为在岩石组合特征、原岩建造、岩石化学及地球化学标志和构造标志等方面二者具有相似的特征,进而提出秦岭地体源自华北陆块;张宏飞等(1995)根据北秦岭地体岩石与华北克拉通南缘基底岩石有相似的 Nd 同位素模式年龄,提出两个地区具有相同的地壳发展阶段,由此认为秦岭岩群归属华北陆块。时毓等(2009)报道了北秦岭地体四个地区秦岭岩群的变质火山岩和变质沉积岩新元古代的锆石年龄,作者根据岩浆作用时代特征认为北秦岭地体归属扬子陆块;不少学者也持有相同的观点:根据北秦岭地体基性火山岩和片麻岩类的高放射性成因铅同位素组成特征,朱炳泉(1993,1998)和 Xue *et al.* (1996)认为应该归属扬子陆块;张本仁等(1998)

通过壳幔演化、地幔化学、同位素不均一性和分区的研究,认为在新元古代之前北秦岭地体是扬子陆块的组成部分;根据秦岭岩群下部岩层的岩性特征,Huang and Wu(1992)将其划为扬子陆块基底。欧阳建平和张本仁(1996)通过铅-铋同位素组成和微量元素组成沉积岩地球化学的研究,认为北秦岭地体在古元古代期间由强亏损型的上地幔形成新生地壳,进一步演化成为独立的微古陆,类似与张本仁等(1995,1996)的观点,即北秦岭地体很可能是扬子陆块北部洋壳上形成的微陆块;根据许继锋和韩吟文(1996)和许继锋等(1996)的报道,北秦岭地区 MORB 岩石具有独特的高放射成因铅同位素组成特征,明显不同于两侧的华北陆块与扬子陆块;综合秦岭岩群的变质沉积岩和基性岩具有明显高的初始 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和 Pb 同位素比值特征,区别于华北陆块基底岩石的低初始 $\varepsilon_{Nd}(t)$ 值和 Pb 同位素比值特征,也不同于扬子地幔同位素组成,董云鹏等(2003)认为北秦岭是 2000 Ma 左右形成于华北陆块外侧洋岛基础上的独立微陆块。

根据已有资料,扬子陆块尤其扬子陆块北缘,经历了新

元古代中-晚期(约 750 ~ 850Ma)为主的岩浆作用(如:Zheng *et al.*, 2004, 2008; Zhou *et al.*, 2006; Wang *et al.*, 2010)。在具有扬子陆块构造归属的南秦岭地区,武当群同样主要记录了新元古代晚期的岩浆活动(约 700 ~ 750Ma;凌文黎等, 2007;祝禧艳等, 2008, 2009)。而秦岭岩群花岗岩正片麻岩体的原岩主要形成于新元古代早期,多数集中于 890 ~ 980Ma 之间(如:裴先治等, 1996, 2003, 2007;王涛等, 1998, 2005;张成立等, 2004;陆松年等, 2005)。本文报道的五个秦岭岩群片麻岩样品的年龄分析结果表明,基底岩石主要记录了中元古代(约 1400 ~ 1600Ma)和新元古代早期(约 850 ~ 950Ma)的岩浆活动。这些结果说明,北秦岭地体经历强烈的新元古代早期岩浆活动,基本上缺乏新元古代中晚期岩浆作用(约 700 ~ 800Ma),与扬子陆块基底岩石在岩浆作用时代上存在着差异。华北陆块及其南缘地区不曾发育新元古代岩浆热事件,但普遍存在新太古代和古元古代岩浆和变质事件记录。本文报道的秦岭岩群片麻岩的锆石年龄并没有明显的体现新太古代和古元古代记录。因此,可以推断秦岭地体是独立于扬子陆块和华北陆块演化的可能性较大。

秦岭岩群被认为是北秦岭地体中最古老的前寒武纪结晶基底(张国伟等, 2001),因此秦岭岩群的形成时代是揭示北秦岭造山带形成和演化的最佳研究对象之一。如前所述,对秦岭岩群的形成时代存在三种主要认识,即:古元古代、中元古代和新元古代。张宗清等(1994, 1996)通过碎屑锆石 U-Pb 定年获得秦岭岩群中副片麻岩的年龄为 2226 ~ 2217Ma,结合斜长角闪岩全岩 Sm-Nd 同位素等时线年龄 1987Ma,推测秦岭岩群变质原岩形成于古元古代,属于华北陆块南缘古元古代增生地壳的一部分;Kröner *et al.* (1993)采用单颗粒锆石 Pb-Pb 蒸发法获得变质石英岩中晚太古代碎屑锆石年龄(约 2.55Ga);张宏飞等(1995)根据北秦岭地区不同岩石类型 Sm-Nd 同位素模式年龄峰值(约 2.0Ga),认为早元古代可能是北秦岭地体的早期地壳形成时代。然而,安三元等(1985)通过秦岭岩群和宽坪岩群的对比分析,推测秦岭岩群可能是中元古代的产物;陈能松等(1991)根据秦岭岩群石榴石角闪片岩全岩 Sm-Nd 同位素等时线年龄 1.1 ~ 1.2Ga 限定秦岭岩群地层的形成年龄为中元古代;陆松年等(2006)报道秦岭岩群副变质岩碎屑锆石 SHRIMP 和 LA-ICP-MS U-Pb 年龄,具有 1.5 ~ 1.9Ga 年龄峰值,同时根据秦岭岩群中普遍存在 960 ~ 900Ma 正片麻岩,限定秦岭岩群副片麻岩原岩的沉积时代在 1500 ~ 960Ma 之间,可能为中元古代末期;而且秦岭地区狮子坪乡石架沟一带榴辉岩围岩的锆石核部同样记录了 1400 ~ 1800Ma 中元古代末期岩浆事件(杨经绥等, 2002)。最近,时毓等(2009)报道了北秦岭地体南缘 4 件基底变质岩的锆石 LA-ICP-MS U-Pb 年龄数据,得到三个变质岩浆岩的原岩形成时代为 971 ~ 817Ma,一个变质沉积岩中含有大量的新元古代碎屑,提出秦岭岩群沉积时代为新元古代中晚期。本文报道的秦岭岩群锆石年龄主要集中在 850 Ma、1400 Ma 和 1600 Ma 三个峰值,

个别锆石给出 700 Ma 左右的²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,但其 U-Pb 年龄的谐和程度较低。因此,我们认为,秦岭岩群形成时代可能在中元古代至新元古代早期,秦岭地体主要记录了中元古代(约 1400 ~ 1600Ma)和新元古代早期(约 850 ~ 950Ma)两期岩浆活动事件。

根据前人的研究,北秦岭地体普遍经历了多期的变质变形作用(如:安三元等, 1985;裴先治等, 1995, 1998, 1999;张宗清等, 1996),主要有元古代的褶皱变形、早古生代大型片麻岩的穹隆作用、晚古生代叠加的褶皱变形和中-新生代的翘起、断陷和强烈的碎裂作用(安三元等, 1985)。通过秦岭岩群的片麻岩和混合花岗岩 Rb-Sr 年龄和单颗粒锆石 Pb-Pb 年龄,结合钙质变质岩的矿物组合特征,陈能松等(1990, 1991, 1993)提出北秦岭地体可能遭受了新元古代早期角闪岩相(约 990Ma)和古生代绿片岩相(约 420Ma)两期变质作用的改造,即为晋宁变质旋回和加里东变质旋回。裴先治等(1998)认为北秦岭地体广泛存在晋宁期的强烈构造-岩浆-变质地质事件,是新元古代主体形成的古老造山带,经历了加里东期强烈改造和晚海西-印支期构造变形叠加。王涛等(1997)也提出秦岭岩群遭受过晋宁期(780 ~ 740Ma)和加里东-海西期(415 ~ 286Ma)两期变质变形叠加。

本文分析的样品中含有大量的新元古代岩浆锆石(约 850 ~ 950Ma),表明北秦岭地体广泛存在晋宁期强烈构造-岩浆-变质事件。在两个片麻岩样品中(08HN79 和 08HN77)共有六颗锆石具有低 Th/U 比值(< 0.03),变质成因锆石的特征,其²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄变化在 465Ma 至 510Ma 之间,加权平均值 477 ± 18Ma,可以代表早古生代变质作用的时期。这一变质事件可能与北秦岭早古生代造山作用存在成因上的联系。在北秦岭地体南北两侧,发现了在活动陆缘挤压构造背景下形成的,由洋盆消减的火山杂岩和深成侵入杂岩组成的两条早古生代构造-岩浆杂岩带(如:张国伟等, 2001)。近年来,在秦岭岩群的南北两侧也相继发现了两条近同时的早古生代高压-超高压变质岩带(如:胡能高等, 1994, 1995;杨经绥等, 2002;陈丹玲等, 2004)。北侧高压变质岩石主要出露在朱阳关-夏馆断裂带南侧秦岭群片麻岩中,由呈透镜体状的榴辉岩组成(胡能高等, 1994, 1995)。南侧高压变质岩石呈透镜体状断续出露在陕西商南县松树沟-河南西峡县寨根一带,主要由高压基性麻粒岩、长英质高压麻粒岩和高压不纯大理岩等构成(刘良和周鼎武, 1994;刘良等, 1995, 1996)。高压变质作用时代主要集中在 520 ~ 480Ma 左右(如:杨经绥等, 2002;陈丹玲等, 2004)。同时,在秦岭岩群南侧发育一条古生代早期岛弧型苏长-辉长岩带,包括有拉鸡庙、四方台和富水杂岩等岩体(李曙光等, 1993; Lerch *et al.*, 1995)。根据已报道的资料,在秦岭岩群中出露了与俯冲碰撞有关的花岗岩体,如早古生代漂池花岗岩(495 ± 6Ma),形成时代与高压变质作用时间大体一致(王涛等, 2009),因此,它们被认为与高压变质岩构成较完整的板缘俯冲造山作用。

6 结论

出露于丹凤-西峡地区的秦岭岩群片麻岩的锆石 U-Pb 年龄分析结果表明,北秦岭地体前寒武纪基底岩石记录了中元古代(约 1400 ~ 1600Ma)和新元古代早期(约 850 ~ 950Ma)两期主要的岩浆作用事件,基本上缺乏早元古代和太古代岩浆活动。北秦岭地体在岩浆作用期次和时代上区别于扬子陆块北缘和华北陆块南缘,可能是中-新元古代形成的独立微陆块。片麻岩中变质锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄的加权平均值为 477 ± 18Ma,与北秦岭地体南北缘高压变质作用时代基本一致,指示基底岩石经历早古生代变质作用的叠加。北秦岭地体应该形成于中元古代晚期至新元古代早期,可能是晋宁期洋壳俯冲、陆陆汇聚的碰撞造山作用的产物。在北秦岭早古生代造山作用过程中,秦岭岩群遭受到俯冲-碰撞造山作用的叠加。

致谢 衷心感谢王芳、聂虎和 Hieu Pham Trung 在野外工作的帮助和中国科学技术大学侯振辉博士对分析测试的指导。感谢两位评审专家对本文提出的宝贵意见。

References

- An SY, Zhou TM and Hu NG. 1985. The history of structural deformation and metamorphism of the Qinling Group and its age assignment. *Geological Bulletin of China*, 13: 87 - 93 (in Chinese with English abstract)
- An SY. 1993. Recent tiding of geology and some problems of the northern Qinling. *Journal of Xi'an College of Geology*, 15(4): 52 - 56 (in Chinese with English abstract)
- Belousova EA, Griffin WL, O'Reilly *et al.* 2002. Igneous zircon: Trace element composition as an indicator of source rock type. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 143: 602 - 622
- Bingen B, Austrheim H, Whitehouse MJ *et al.* 2004. Trace element signature and U-Pb geochronology of eclogite-facies zircon, Bergen Arc, Caledonides of W-Norway. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 147: 671 - 683
- Chen DL, Liu L, Sun Y *et al.* 2004. LA-ICP-MS zircon U-Pb dating for high-pressure basic granulites from North Qinling and its geological significance. *Chinese Science Bulletin*, 49(21): 2296 - 2304
- Chen NS, You ZD and Han YJ. 1990. Some significant progresses in metamorphism research on the core complex of eastern Qinling orogenic belt, western Henan. *Geological Science and Technology Information*, 9(3): 20 - 24 (in Chinese with English abstract)
- Chen NS, Han YJ, You ZD *et al.* 1991. Whole rock Sm-Nd, Rb-Sr and single zircon Pb-Pb dating of complex rocks from the interior of Qinling orogenic belt, western Henan, and its crustal evolution. *Geochemica*, 3: 219 - 228 (in Chinese with English abstract)
- Chen NS, Zhou HW, Yang Y *et al.* 1993. Metamorphic evolution in calcareous rocks in the core complex of eastern Qinling orogenic belt, western Henan. *Acta Petrologica Sinica*, 9(3): 240 - 254 (in Chinese with English abstract)
- Dong YP, Zhang GW and Zhu BQ. 2003. Proterozoic tectonics and evolutionary history of the North Qinling terrane. *Acta Geoscientia Sinica*, 24(1): 3 - 10 (in Chinese with English abstract)
- Hu NG, Zhao DL, Xu BQ *et al.* 1994. Discovery of coesite-bearing eclogite from the northern Qinling and its significances. *Chinese Science Bulletin*, 40(2): 174 - 176
- Hu NG, Zhao DL, Xu BQ *et al.* 1995. Petrography and metamorphism study on high-ultrahigh pressure eclogite from Guanpo area, northern Qinling Mountain. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 15(4): 2 - 9 (in Chinese with English abstract)
- Huang W and Wu ZW. 1992. Evolution of the Qinling orogenic belt. *Tectonics*, 11: 371 - 380
- Kröner A, Zhang GW and Sun Y. 1993. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: Geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of eastern Asia. *Tectonics*, 12(1): 245 - 255
- Lerch MF, Xue F, Kröner A *et al.* 1995. A middle Silurian-Early Devonian magmatic arc in the Qinling Mountains of central China. *The Journal of Geology*, 103: 437 - 449
- Li HK, Lu SN, Chen ZH *et al.* 2003. Zircon U-Pb geochronology of rift-type volcanic rocks of the Yaolinghe Group in the South Qinling orogen. *Geological Bulletin of China*, 22(10): 775 - 781 (in Chinese with English abstract)
- Li SG, Chen YZ, Zhang ZQ *et al.* 1993. Trace elements and Sr, Nd isotopic geochemistry of the Lajimiao norite-gabbro from the north Qinling belt. *Acta Geologica Sinica*, 67(4): 310 - 322 (in Chinese with English abstract)
- Li YL, Zhang GW and Song CZ. 1998. Characteristics of bidirectional subduction of Erlangping backarc basin in the East Qinling. *Geological Journal of China Universities*, 4(3): 286 - 293 (in Chinese with English abstract)
- Lin WL, Ren BF, Duan RC *et al.* 2008. Timing of the Wudangshan, Yaolinghe volcanic sequences and mafic sills in South Qinling: U-Pb zircon geochronology and tectonic implication. *Chinese Science Bulletin*, 53(14): 2192 - 2199
- Liu GH, Zhang SG, You ZD *et al.* 1993. Metamorphic History of Main Metamorphic Complexes in the Qinling Orogenic Belt. Beijing: Geological Publishing House, 1 - 190 (in Chinese)
- Liu L and Zhou DW. 1995. Discovery and study of high pressure mafic granulites in Songshugou area of Shangnan, East Qinling. *Chinese Science Bulletin*, 40(4): 400 - 404
- Liu L, Zhou DW, Dong YP *et al.* 1995. High pressure metabasites and their retrograde metamorphic *P-T-t* path from Songshugou area, eastern Qinling Mountain. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 127 - 136 (in Chinese with English abstract)
- Liu L, Zhou DW, Wang Y *et al.* 1996. Study and implication of the high-pressure felsic granulite in the Qinling complex of east Qinling. *Science in China (Series D)*, 26 (Suppl.): 60 - 68
- Liu XM, Gao S, Diwu CR *et al.* 2007. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20µm spot size. *Chinese Science Bulletin*, 52(9): 1257 - 1264
- Lu SN, Chen ZH, Li HK *et al.* 2005. Two magmatic belts of the Neoproterozoic in the Qinling orogenic belt. *Geological Bulletin of China*, 79(2): 165 - 173 (in Chinese with English abstract)
- Lu SN, Chen ZH, Xiang ZQ *et al.* 2006. U-Pb ages of detrital zircons from the para-metamorphic rocks of the Qinling Group and their geological significance. *Earth Science Frontiers*, 13(6): 303 - 310 (in Chinese with English abstract)
- Ludwig KR. 2003. *Isoplot 3.00. A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel*. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, No. 4: 74
- Meng QR and Zhang GW. 1999. Timing of collision of the North and South China blocks: Controversy and reconciliation. *Geology*, 27: 123 - 126
- Meng QR and Zhang GW. 2000. Geologic framework and tectonic evolution of the Qinling orogen, central China. *Tectonophysics*, 323: 183 - 196
- Ouyang JP and Zhang BR. 1996. Geochemical evidence for the formation and evolution of North Qinling microcontinent. *Science in China (Series D)*, 39 (Suppl.): 43 - 49
- Pei XZ, Zhang WJ, Wang T *et al.* 1995. Geological characteristics and tectonic evolution of the north Qinling orogenic belt. *Northwestern*

- Geology, 16(4): 8-12 (in Chinese)
- Pei XZ, Li HM and Li GG. 1996. Geochemical characteristics and tectonic environment of the Shangnan granite pluton in the north Qinling. *Journal of Xi'an College of Geology*, 18(3): 29-35 (in Chinese with English abstract)
- Pei XZ. 1997. Composition and Tectonic Evolution of Shangdan Fault Zone in the Eastern Qinling. Xi'an; Xi'an Cartographic Press, 119-133 (in Chinese)
- Pei XZ, Wang Y, Wang T *et al.* 1998. Crustal composition and tectonic evolution of the north Qinling orogenic belt. *Progress in Precambrian Research*, 21(4): 26-35 (in Chinese with English abstract)
- Pei XZ, Wang T, Wang Y *et al.* 1999. Major geological events of Jinning period and their tectonic settings in the north Qinling. *Geological Journal of China Universities*, 5(2): 137-147 (in Chinese with English abstract)
- Pei XZ, Wang T, Ding SP *et al.* 2003. Geochemical characteristics and geological significance of Neoproterozoic adakitic granitoids on the north side of the Shangdan zone in the East Qinling. *Geology in China*, 30(4): 372-381 (in Chinese with English abstract)
- Pei XZ, Ding SP, Zhang GW *et al.* 2007. Zircons LA-ICP-MS U-Pb dating of Neoproterozoic granitoid gneisses in the north margin of west Qinling and geological implication. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 772-786 (in Chinese with English abstract)
- Rubatto D. 2002. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism. *Chemical Geology*, 184: 123-138
- Shi Y, Yu JH, Xu XS *et al.* 2009. Geochronology and geochemistry of the Qinling Group in the eastern Qinling orogenic belt. *Acta Petrologica Sinica*, 25(10): 2651-2670 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts; Implications for mantle composition and processes. In: Saunders AD and Norry MJ (eds.). *Magmatism in the Ocean Basins*. Special Publications, Geological Society, 42: 313-345
- Sun Y, Lu XX, Han S *et al.* 1996. Composition and formation of Palaeozoic Erlangping ophiolitic slab, north Qinling: Evidence from geology and geochemistry. *Science in China (Series D)*, 26(Suppl.): 50-59
- Taylor SR and McLennan SM. 1985. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Oxford, UK: Blackwell
- Wang T, Hu NG, Pei XZ *et al.* 1997. The composition, tectonic framework and evolution of Qinling Complex, Central China. *Acta Geoscientia Sinica*, 18(4): 345-351 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Li WP and Wang XX. 1998. Zircon U-Pb age of the Niujaoshan granitoid gneisses in the Qinling complex of the Qinling Orogenic belt-with a discussion of its geological significance. *Regional Geology of China*, 17(3): 262-265 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Zhang GW, Pei XZ *et al.* 2002. Possibility of the existence of a Neoproterozoic NW trending orogenic belt in the North Qinling and convergence and breakup of blocks on its two sides. *Geological Bulletin of China*, 21(8-9): 516-522 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Zhang ZQ, Wang XX *et al.* 2005. Neoproterozoic collisional deformation in the core of the Qinling orogen and its age: Constrained by zircon SHRIMP dating of strongly deformed syn-collisional granites and weakly deformed granitic veins. *Acta Geologica Sinica*, 79(2): 220-231 (in Chinese with English abstract)
- Wang T, Wang XX, Tian W *et al.* 2009. North Qinling Paleozoic granite associations and their variation in space and time: Implications for orogenic processes in the orogens of central China. *Science in China (Series D)*, 52(9): 1359-1384
- Wang W, Wang F, Chen F *et al.* 2010. Neoproterozoic tectonic evolution of the South China block: Evidence from detrital zircon U-Pb ages and Hf-Nd isotopic composition of sedimentary rocks. *Journal of Geology*, 118: 79-94
- Xu GZ and Wang YF. 1990. On the characteristics of Precambrian structural evolution of the east Qinling Mountain. *Scientia Geologica Sinica*, 2: 101-112 (in Chinese with English abstract)
- Xu JF and Han YW. 1996. High radioactive Pb-isotope composition of ancient MORB-type rocks from Qinling area; Evidence for the presence of Tethyan-type oceanic mantle. *Science in China (Series D)*, 26(Suppl.): 33-42
- Xu JF, Zhang BR and Han YW. 1996. Discovery of high radiogenic Pb isotope composition from Proterozoic mafic rocks in north Qinling area and its implication. *Chinese Science Bulletin*, 42(1): 51-54
- Xue F, Kröner A, Reischmann T *et al.* 1996. Palaeozoic pre- and post-collision calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks. *Journal of Geological Society London*, 153: 409-417
- Yang JS, Xu ZQ, Pei XZ *et al.* 2002. Discovery of diamond in north Qinling; Evidence for a giant UHPM belt across central China and recognition of Paleozoic and Mesozoic dual deep subduction between north China and Yangtze plates. *Acta Geologica Sinica*, 76(4): 484-495 (in Chinese with English abstract)
- Yang JS, Liu FL, Wu CL *et al.* 2003. Two ultrahigh pressure metamorphic events recognized in the central orogenic belt of China: Evidence from the U-Pb dating of coesite-bearing zircons. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 463-477 (in Chinese with English abstract)
- You ZD, Suo ST, Han YJ *et al.* 1990. The metamorphic and deformational history of the Qinling complex. In: Liu GH and Zhang SG (eds.). *A Selection of Papers Presented at the Conference on the Qinling-Daba Mountains geology (No. 1): Metamorphic Geology*. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 1-10 (in Chinese)
- You ZD, Suo ST, Han YJ *et al.* 1991. *Metamorphic Process and Structural Analysis of the Core of Orogen: Such as East Qinling*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1-326 (in Chinese)
- You ZD, Han YJ, Suo ST *et al.* 1993. Metamorphic history and tectonic evolution of the Qinling complex, eastern Qinling Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 549-560
- Zhang BR, Zhang HF, Xu JF *et al.* 1995. Application of isotopic mapping and chemical geodynamics to studying the east Qinling orogenic belt. *Earth Science*, 20(5): 551-555 (in Chinese with English abstract)
- Zhang BR, Zhang HF, Zhao ZD *et al.* 1996. Geochemical subdivision and evolution of the lithosphere in East Qinling and adjacent regions-Implications for tectonics. *Science in China (Series D)*, 39(3): 245-255
- Zhang BR, Han YW, Xu JF *et al.* 1998. Geochemical evidence for North Qinling being a part of Yangtze plate prior to the Neoproterozoic. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 369-381 (in Chinese with English abstract)
- Zhang CL, Liu L, Zhang GW *et al.* 2004. Determination of Neoproterozoic post-collisional granites in the north Qinling Mountains and its tectonic significance. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 33-42 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Mei ZC, Zhou DW *et al.* 1988. *Formation and Evolution of Qinling Orogenic Belt*. Xi'an: Northwest University Press, 1-192 (in Chinese)
- Zhang GW, Zhang ZQ and Dong YP. 1995. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of Qinling orogen; Implications for the tectonic evolution. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 101-114 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Meng QR, Yu ZP *et al.* 1996. Orogenesis and dynamics of the Qinling. *Science in China (Series D)*, 39(3): 225-234
- Zhang GW, Dong YP and Yao AP. 1997. The crustal compositions, structures and tectonic evolution of the Qinling orogenic belt. *Geology of Shan'xi*, 15(2): 1-14 (in Chinese with English abstract)
- Zhang GW, Zhang BR, Yuan XC *et al.* 2001. *Qinling Orogenic Belt and Continental Dynamics*. Beijing: Science Press, 1-855 (in

Chinese)

- Zhang HF, Zhao ZD, Luo TC *et al.* 1995. Crustal growth and lower crust nature of north Qinling: Study of Sm-Nd isotope model ages. *Acta Petrologica Sinica*, (2): 160 – 170 (in Chinese with English abstract)
- Zhang ZQ, Liu DY and Fu GM. 1994. Study of Isotope Geochronology of Metamorphic Stratigraphy of North Qinling. Beijing: Geological Publishing House, 1 – 191 (in Chinese)
- Zhang ZQ, Zhang GW, Fu GM *et al.* 1996. Geochronology of metamorphic strata in the Qinling Mountains and its tectonic implications. *Science in China (Series D)*, 39(3): 283 – 292
- Zhang ZQ, Zhang GW, Tang SH *et al.* 2002. The age of metamorphic rocks of the Wudang Group. *Geology in China*, 29(2): 117 – 125 (in Chinese with English abstract)
- Zhao ZR, Wan YS, Zhang SG *et al.* 1995. The geochemical features of the Douling metamorphic complex. *Acta Petrologica Sinica*, 11(2): 148 – 159 (in Chinese with English abstract)
- Zheng YF, Wu YB, Chen F *et al.* 2004. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68: 4145 – 4165
- Zheng YF, Wu YB, Zhao ZF *et al.* 2005. Metamorphic effect on zircon Lu-Hf and U-Pb isotope systems in ultrahigh-pressure eclogite-facies metagranite and metabasite. *Earth and Planetary Science Letters*, 240: 378 – 400
- Zheng YF, Gong B, Zhao ZF *et al.* 2008. Zircon U-Pb age and O isotope evidence for Neoproterozoic low- ^{18}O magmatism during supercontinental rifting in South China; Implications for the snowball earth event. *American Journal of Science*, 308: 484 – 516
- Zhou MF, Ma YX, Yan DP *et al.* 2006. The Yanbian Terrane (Southern Sichuan Province, SW China): A Neoproterozoic arc assemblage in the western margin of the Yangtze Block. *Precambrian Research*, 144: 19 – 38
- Zhu BQ. 1993. Tri-dimension special topological diagrams of ore land isotopes and their application to the division of geochemical provinces and mineralization. *Geochemica*, 22(3): 209 – 216 (in Chinese with English abstract)
- Zhu BQ, Chang XY, Qiu HN *et al.* 1998. Characteristics of Proterozoic basements on the geochemical steep zones in the continent of China and their implications for setting superlarge deposits. *Science in China (Series D)*, 41(Suppl.): 54 – 64
- Zhu XY, Chen F, Wang W *et al.* 2008. Zircon U-Pb ages of volcanic and sedimentary rocks of the Wudang Group in the Qinling orogenic belt within western Henan Province. *Acta Geoscientia Sinica*, 29(6): 817 – 829 (in Chinese with English abstract)
- Zhu XY, Chen F, Yang L *et al.* 2009. Zircon Hf isotopic composition and source characteristics of the Wudang Group in the Qinling orogenic belt, western Henan Province. *Acta Petrologica Sinica*, 25(11): 3017 – 3028 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 安三元, 周廷梅, 胡能高. 1985. 秦岭群的构造变形和变质史及其时代问题综述. *地质通报*, 3: 87 – 93
- 安三元. 1993. 北秦岭地质新知及一些有关问题. *西安地质学院学报*, 15(4): 52 – 56
- 陈丹玲, 刘良, 孙勇等. 2004. 北秦岭松树沟高压基性麻粒岩锆石的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及其地质意义. *科学通报*, 49(18): 1901 – 1908
- 陈能松, 游振东, 韩郁菁. 1990. 豫西东秦岭造山带核部杂岩变质作用研究若干进展. *地质科技情报*, 9(3): 20 – 24
- 陈能松, 韩郁菁, 游振东等. 1991. 豫西东秦岭造山带核部杂岩全岩 Sm-Nd、Rb-Sr 和单晶锆石 ^{207}Pb - ^{206}Pb 计时及其地壳演化. *地球化学*, 3: 219 – 228

- 陈能松, 周汉文, 杨勇等. 1993. 豫西东秦岭造山带核部杂岩中钙质变质岩的变质作用演化. *岩石学报*, 9(3): 240 – 254
- 董云鹏, 张国伟, 朱炳泉. 2003. 北秦岭构造属性与元古代构造演化. *地球学报*, 24(1): 3 – 10
- 胡能高, 赵东林, 徐柏青等. 1994. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义. *科学通报*, 39(21): 2013
- 胡能高, 赵东林, 徐柏青等. 1995. 北秦岭官坡地区高压-超高压榴辉岩岩相学及变质作用研究. *矿物岩石*, 15(4): 1 – 9
- 李怀坤, 陆松年, 陈志宏等. 2003. 南秦岭耀岭河群裂谷型火山岩锆石 U-Pb 年代学. *地质通报*, 22(10): 775 – 781
- 李曙光, 陈移之, 张宗清等. 1993. 北秦岭拉鸡庙苏长辉长岩的痕量元素和 Sr、Nd 同位素地球化学. *地质学报*, 67(4): 310 – 322
- 李亚林, 张国伟, 宋传中. 1998. 东秦岭二郎坪弧后盆地双向式俯冲特征. *高校地质学报*, 4(3): 286 – 293
- 凌文黎, 任邦方, 段瑞春等. 2007. 南秦岭武当山群、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. *科学通报*, 52(12): 1445 – 1456
- 刘国惠, 张寿广, 游振东等. 1993. 秦岭造山带主要变质岩群及变质演化. 北京: 地质出版社, 1 – 190
- 刘良, 周鼎武. 1994. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究. *科学通报*, 39(17): 1599 – 1601
- 刘良, 周鼎武, 董云鹏等. 1995. 东秦岭松树沟高压变质基性岩石及其退变质作用的 *P/T* 演化轨迹. *岩石学报*, 11(2): 127 – 136
- 刘良, 周鼎武, 王焰等. 1996. 东秦岭秦岭杂岩中的长英质高压麻粒岩及其地质意义初探. *中国科学(D辑)*, 26(增刊): 56 – 63
- 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. *地质学报*, 79(2): 165 – 173
- 陆松年, 陈志宏, 相振群等. 2006. 秦岭岩群副变质岩碎屑锆石年龄谱及其地质意义探讨. *地学前缘*, 13(6): 303 – 310
- 欧阳建平, 张本仁. 1996. 北秦岭微古陆形成与演化的地球化学证据. *中国科学(D辑)*, 26(增刊): 42 – 48
- 裴先治, 张维吉, 王涛等. 1995. 北秦岭造山带的地质特征及其构造演化. *西北地质*, 16(4): 8 – 12
- 裴先治, 李厚民, 李国光. 1996. 北秦岭商南花岗岩体地球化学特征及其形成的构造环境. *西安地质学院学报*, 18(3): 29 – 35
- 裴先治. 1997. 东秦岭商丹断裂带的组成与构造演化. 西安: 西安地图出版社, 119 – 133
- 裴先治, 王洋, 王涛. 1998. 北秦岭前寒武纪地壳组成及其构造演化. *前寒武纪研究进展*, 21(4): 26 – 35
- 裴先治, 王涛, 王洋等. 1999. 北秦岭晋宁期主要地质事件及其构造背景探讨. *高校地质学报*, 5(2): 137 – 147
- 裴先治, 王涛, 丁仁平等. 2003. 东秦岭商丹带北侧新元古代埃达克质花岗岩及其地质意义. *中国地质*, 30(4): 372 – 381
- 裴先治, 丁仁平, 张国伟等. 2007. 西秦岭北缘新元古代花岗质片麻岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及其地质意义. *地质学报*, 81(6): 772 – 786
- 时毓, 于津海, 徐夕生等. 2009. 秦岭造山带东段秦岭岩群的年代学和地球化学研究. *岩石学报*, 25(10): 2651 – 2670
- 孙勇, 卢欣祥, 韩松等. 1996. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学. *中国科学(D辑)*, 26(增刊): 49 – 55
- 王涛, 胡能高, 裴先治等. 1997. 秦岭造山带核部杂岩的组成、构造

- 格局及演化. 地球学报, 18(4): 345 - 351
- 王涛, 李伍平, 王晓霞. 1998. 秦岭杂岩牛角山花岗岩质片麻岩体锆石 U-Pb 同位素年龄及其地质意义. 中国区域地质, 17(3): 262 - 265
- 王涛, 张国伟, 裴先治等. 2002. 北秦岭新元古代北北西向碰撞造山存在的可能性及两侧陆块的聚合与裂解. 地质通报, 21(8-9): 516 - 522
- 王涛, 张宗清, 王晓霞等. 2005. 秦岭造山带核部新元古代碰撞变形及其时代-强变形同碰撞花岗岩与弱变形脉体锆石 SHRIMP 年龄限定. 地质学报, 79(2): 220 - 231
- 王涛, 王晓霞, 田伟等. 2009. 北秦岭古生代花岗岩组合、岩浆时空演变及其对造山作用的启示. 中国科学(D 辑), 39(7): 949 - 971
- 徐贵忠, 王艺芬. 1990. 论东秦岭前寒武纪的构造演化特征. 地质科学, 2: 101 - 112
- 许继锋, 韩吟文. 1996. 秦岭古 MORB 型岩石的高放射性成因铅同位素组成-特提斯型古洋幔存在的证据. 中国科学(D 辑), 26(增刊): 34 - 41
- 许继锋, 张本仁, 韩吟文. 1996. 北秦岭元古宙基性岩的高放射成因铅同位素组成的发现及其意义. 科学通报, 41(19): 1771 - 1774
- 杨经绥, 许志琴, 裴先治等. 2002. 秦岭发现金刚石: 横贯中国中部巨型超高压变质带新证据及古生代和中生代两期深俯冲作用的识别. 地质学报, 76(4): 484 - 495
- 杨经绥, 刘福来, 吴才来等. 2003. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用来自含柯石英锆石的定年证据. 地质学报, 77(4): 463 - 477
- 游振东, 索书田, 韩郁菁等. 1990. 秦岭杂岩变质变形史. 见: 刘国惠, 张寿广(主编). 秦岭-大巴山地质论文集(一): 变质地质. 北京: 北京科学技术出版社, 1 - 10
- 游振东, 索书田, 韩郁菁等. 1991. 造山带核部杂岩变质过程与构造解析——以东秦岭为例. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 - 326
- 张本仁, 张宏飞, 许继锋等. 1995. 同位素地球化学填图与化学地球动力学在东秦岭造山带研究中的应用. 地球科学, 20(5): 551 - 555
- 张本仁, 张宏飞, 赵志丹等. 1996. 东秦岭及邻区壳、幔地球化学分区和演化及其大地构造意义. 中国科学(D 辑), 26(3): 201 - 208
- 张本仁, 韩吟文, 许继锋等. 1998. 北秦岭新元古代前属于扬子板块的地球化学证据. 高校地质学报, 4(4): 369 - 381
- 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. 地学前缘, 11(3): 33 - 42
- 张国伟, 梅志超, 周鼎武等. 1988. 秦岭造山带的形成及其演化. 西安: 西北大学出版社, 1 - 192
- 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 1995. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. 岩石学报, 11(2): 101 - 114
- 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. 中国科学(D 辑), 26(3): 195 - 200
- 张国伟, 董云鹏, 姚安平. 1997. 秦岭造山带基本组成与结构及其构造演化. 陕西地质, 15(2): 1 - 14
- 张国伟, 张本仁, 袁学诚等. 2001. 秦岭造山带与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 1 - 855
- 张宏飞, 赵志丹, 骆庭川. 1995. 从岩石 Sm-Nd 同位素模式年龄论北秦岭地壳增生和地壳深部性质. 岩石学报, 11(2): 160 - 170
- 张宗清, 刘敦一, 付国民. 1994. 北秦岭变质地层同位素年代研究. 北京: 地质出版社, 1 - 191
- 张宗清, 张国伟, 付国民等. 1996. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. 中国科学(D 辑), 26(3): 216 - 222
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒等. 2002. 武当群变质岩年龄. 中国地质, 29(2): 117 - 125
- 赵子然, 万渝生, 张寿广等. 1995. 早元古陡岭群变质杂岩的岩石地球化学特征. 岩石学报, 11(2): 148 - 159
- 朱炳泉. 1993. 矿石 Pb 同位素三维空间拓扑图解用于地球化学省与矿种区划. 地球化学, 22(3): 209 - 216
- 朱炳泉, 常向阳, 邱华宁等. 1998. 地球化学急变带的元古界基底特征及其与超大型矿床产出的关系. 中国科学(D 辑), 28(增刊): 63 - 70
- 祝禧艳, 陈福坤, 王伟等. 2008. 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. 地球学报, 29(6): 817 - 829
- 祝禧艳, 陈福坤, 杨力等. 2009. 豫西地区秦岭造山带武当群锆石 Hf 同位素组成及其物源特征. 岩石学报, 25(11): 3017 - 3028