

doi:10.3969/j.issn.1007-3701.2015.02.005

北桐柏长英质麻粒岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄及微量元素研究及其构造意义

李少荣¹, 陈思^{1,2}, 李德万¹

LI Shao-Rong¹, CHEN Si^{1,2}, LI De-Wan¹

(1. 外生成矿与矿山环境重庆市重点实验室(重庆地质矿产研究院), 重庆 400042; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074)

(1. Chongqing Key Laboratory of Exogenic Mineralization and Mine Environment, Chongqing Institute of Geology and Mineral Resources, Chongqing 400042, China; 2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

摘要:桐柏造山带中秦岭群中出露有志留纪麻粒岩,然而其原岩形成时代和变质年龄却没有得到有效的约束。本文对北桐柏秦岭群中长英质麻粒岩中锆石开展了详细的形貌学、阴极发光图像、微量元素以及 U-Pb 年代学研究。LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 定年结果表明继承碎屑锆石给出了 2.7~0.55 Ga 的年龄,岩浆锆石给出了 478 ± 7 Ma (MSWD=0.73) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄,代表了桐柏长英质麻粒岩原岩的形成年龄。变质锆石区域获得了 437 ± 7 Ma (MSWD=1.3, n=10) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄。结合锆石微量元素特征和前人研究结果表明 437 ± 7 Ma 可能代表了前进变质阶段的年龄。而最外层的增生边给出了 406 ± 8 Ma (MSWD=0.72, n=4) 的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄,代表了退变质年龄。我们认为在 480 Ma 时,商丹洋已开始向北俯冲,导致 480 Ma 左右的岩浆作用,由于持续的俯冲消减,在 440~420 Ma 时,洋中脊与弧交汇,发生洋脊俯冲导致志留纪麻粒岩相变质作用以及岩浆作用的发生。

关键词:长英质麻粒岩;锆石 U-Pb 年龄;秦岭群;北桐柏

中图分类法 P597+.3

文献标识码:A

文章编号:1007-3701(2015)02-158-09

Li S R, Chen S and Li D W. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology and trace elements study of felsic granulite from north Tongbai, central China and its geological significance. *Geology and Mineral Resources of South China*, 2015, 31(2):158–166.

Abstract: Granulite-facies metamorphic rocks in the Tongbai orogen have great implications for the evolution of the whole Qinling-Tongbai-Dabie orogenic belt. However, the protolith age and granulite-facies metamorphic timing of the granulites have not been well constrained yet. In this paper, CL imaging, trace element analysis and U-Pb dating of zircon were undertaken for felsic granulite from Tongbai orogen. U-Pb ages of the inherited detrial zircons and the magmatic zircons are 2.7Ga–0.55Ga and 478 ± 7 Ma (MSWD=0.73), respectively, which represent the formation age of the protolith. The metamorphic zircon rim yield a weighted mean age of 437 ± 7 Ma (MSWD=1.3, n=10), which represent the metamorphic age. Considering the trace-element characteristics of zircons as well as former studies, the age of 437 ± 7 Ma was suggested as the prograde metamorphic age. The outer overgrowth rim yield a weighted mean age of 406 ± 8 Ma (MSWD=0.72, n=4), suggesting retrograde metamorphism. Available results indicate that the northward subduction of the Prototethyan Shangdan oceanic crust produced a series of magmatic pulses and metamorphism at ca. 480 Ma in the North Qinling-Tongbai orogen. At

收稿日期:2015-03-31;修回日期:2015-05-04。

第一作者:李少荣(1971—),男,硕士,现从事区域地质调查与研究、管理工作,E-mail:472008429@qq.com.

440420 Ma, a ridge is interpreted to have entered the subduction realm, resulting granulite-facies metamorphism and coeval magmatism.

Key words: mafic granulite; zircon U-Pb dating; metamorphism; northern Tongbai

秦岭–桐柏–大别–苏鲁造山带是扬子克拉通与华北克拉通的碰撞产物,是世界上最大的超高压变质带并且被深入的研究^[1–7]。该造山带是一个经典的复合造山带,在早古生代、石炭纪、三叠纪经历了多期高压–超高压变质作用^[4]。桐柏造山带位于秦岭–桐柏–大别–苏鲁造山带东西部位的连接处,包含有志留纪麻粒岩和一系列相关的岩浆岩^[1,8–9]。桐柏麻粒岩为认识古生代造山运动构造演化提供了一个重要的窗口。然而,对于桐柏麻粒岩的原岩形成时代、变质作用的时间和性质仍然存在争议^[1,9–12]。此外,有关桐柏麻粒岩的构造背景问题也一直未得

到解决^[1,9–12]。

本文对桐柏秦岭群中长英质麻粒岩开展了详细的锆石形貌学、微量元素以及年代学研究,其结果不仅揭示了长英质麻粒岩原岩及麻粒岩相变质时代,同时对于理解古生代造山运动的构造演化具有重要的意义。

1 区域地质概况

桐柏造山带位于秦岭造山带和大别造山带接壤部位,其构造岩石单位可与南阳盆地以西的东秦

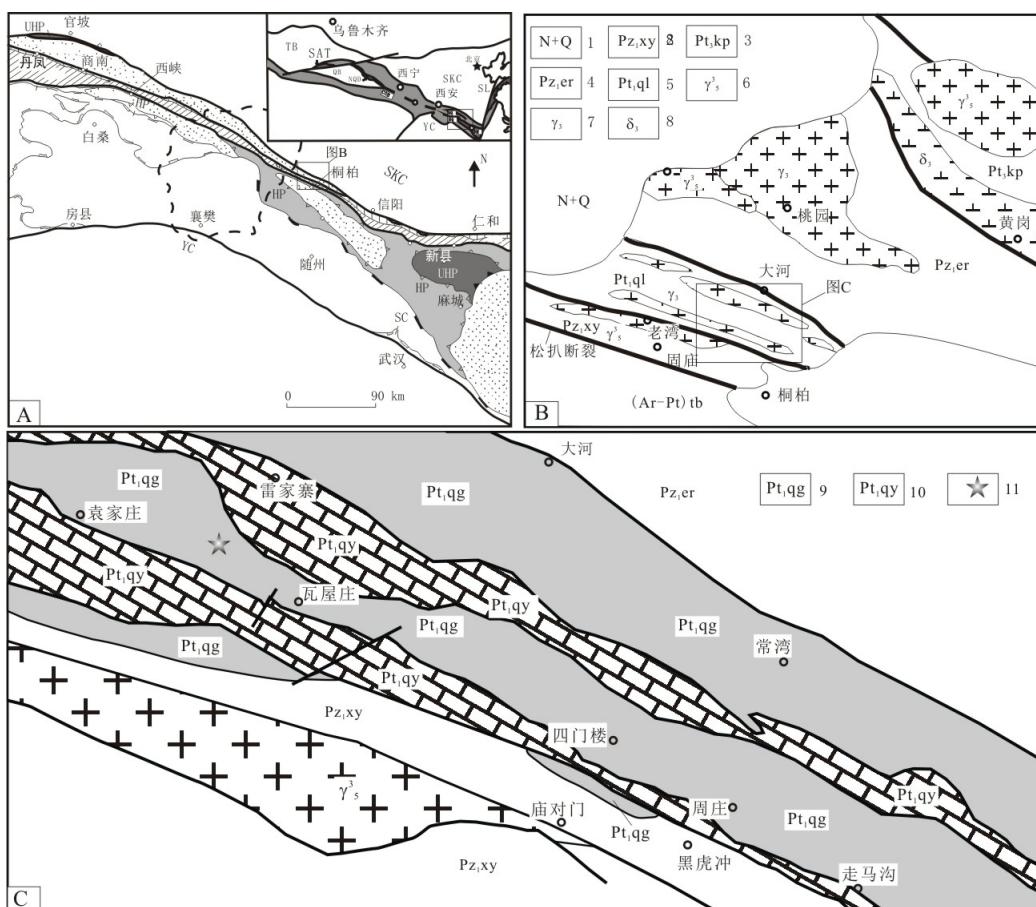


图1 桐柏及邻区地质简图

Fig. 1. Simplified geological map of Tongbai area and the adjacent areas

A–东秦岭–桐柏–大别构造框架图(据文献[25]修改);B–北桐柏地质简图;C–研究区地质简图(据文献[22]修改)

1–第三纪、第四纪;2–早古生代信阳群;3–新元古代宽坪群;4–早古生代二郎坪群;5–秦岭群杂岩;6–燕山期花岗岩;7–加里东期花岗岩;8–加里东期超基性–基性–中酸性杂岩;9–秦岭群郭庄组;10–秦岭群雁勾组;11–采样点。

岭构造岩石单位对比^[1,13](图 1-A), 它以松扒断裂为界(可能为商丹断裂的东沿部分)划分为北桐柏和南桐柏, 对应于秦岭地区的北秦岭和南秦岭(图 1-B)。南桐柏地区包括含榴辉岩的高压变质岩系、角闪岩相片麻岩和蓝片岩-绿片岩系等。北桐柏地区包括宽坪群、二郎坪群和秦岭群(图 1-B)。宽坪群主要由云母石英片岩、石英岩、大理岩及少量斜长角闪岩组成, 为一套形成于新元古代的变质火山-沉积岩系^[14], 其中产有早古生代黄岗超基性、基性和中酸性侵入杂岩(432 ± 15 Ma, 锆石 U-Pb 年龄^[15])。变沉积岩中碎屑锆石年龄谱具有 0.8-1.0 Ga, 1.2-1.7 Ga 和 2.4-2.6 Ga 的峰, 最年轻的年龄约 0.6 Ga, 这表明宽坪群与华南板块具有亲缘性^[16-18]。锆石 U-Pb 年龄及角闪石 Ar-Ar 年龄表明宽坪群变质年龄为 440~434 Ma 左右。二郎坪群为一套含碎屑岩和大理岩的细碧一角斑岩建造, 形成于早古生代弧后扩张盆地^[19], 在该岩群部分遭受了绿片岩相-角闪岩相变质, 变质年龄为 394 ± 5 Ma 到 440 ± 3 Ma 之间^[10]。二郎坪群被认为是北秦岭地体向华北板块增生过程中形成的洋内弧^[4]。

秦岭群主要由大理岩、片麻岩和斜长角闪岩等组成, 片麻岩中含有麻粒岩。秦岭群中还分布有线型花岗质岩体(如好汉坡岩体), 其形成时代为(430 ± 15) Ma^[1], 现多为片麻状花岗岩。以往一般认为这一地区的麻粒岩呈大小不等的透镜体分布于大面积片麻岩中^[20-21], 而张翠光等(2003)通过详细岩相学、矿物学以及变质温压条件研究, 认为这些透镜体之间的片麻岩实际为经过强烈变形和退变质作用的麻粒岩, 本区的麻粒岩构成一个约 0.5~2.0 km 宽的变质带^[22]。麻粒岩峰期变质 P-T 条件为 840~920 °C, 8.5~9.8 kbar, 并经历了一个逆时针的 P-T 演化轨迹^[1,10-11,23]。Zhang et al.(1998)认为其原岩年龄为 1010 Ma 左右, 变质峰期年龄为 470~480 Ma^[9], 而 Kröner et al.(1993)通过单颗粒锆石蒸发达对麻粒岩和片麻岩进行了定年, 认为其原岩年龄 470 Ma 左右, 变质年龄则在 435~470 Ma 之间^[11]。近年, 大量的锆石 U-Pb 年龄研究结果表明, 桐柏麻粒岩的变质年龄集中在 400~440 Ma 之间, 但对于变质年龄的解释还存在争议。Liu et al.(2011)认为 440 Ma 左右为峰期年龄、420 Ma 左右为退变质年龄^[10]。而另一部分学者则认为 ~440 Ma 为前进变质年龄, 而 ~430 Ma 左右为峰期变质年龄^[8,11,23-24]。

2 样品采集及分析方法

本文所研究的长英质麻粒岩(样号为 Tb-27)采自北桐柏周庄(图 1C)。岩石遭受较强部份熔融, 呈条带状, 中细粒结构, 主要矿物组成为石英 30%, 斜长石 50%, 钾长石 10%, 斜方辉石 10%, 黑云母 3% 和少量锆石。

锆石样品利用标准重矿物分离技术分选, 然后在双目镜下挑选出不同晶形、不同颜色、无明显包裹体和透明度好的锆石, 在玻璃板上用环氧树脂固定, 并抛光至锆石中心。在原位分析之前, 通过双目镜和阴极发光(CL)图像详细研究锆石的晶体形貌和内部结构特征, 以选择同位素分析的最佳点。锆石阴极发光(CL)照相在西北大学大陆动力学国家重点实验室的扫描电镜+Gatan 阴极发光 Mono-CL3+ 上完成。

锆石 U-Pb 年龄和微量元素分析在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室利用 LA-ICP-MS 方法测定, 激光束斑直径为 $32 \mu\text{m}$ 。应用标准锆石 91500 进行同位素分馏校正, 分析方法及仪器参数见文献^[26-27]。锆石测定点的同位素比值、U-Pb 表面年龄和 U-Th-Pb 含量计算采用 GLITTER 4.0 程序, 采用 Andersen(2002)方法对普通 Pb 进行校正^[28], 并采用 ISOPLOT 3.0 程序进行锆石加权平均年龄计算及谐和图绘制^[29]。

4 锆石 U-Pb 定年年龄结果

锆石粒径约 $20\text{--}200 \mu\text{m}$, 晶形以无色透明-浅黄色长柱状为主, 少数为半自形短柱状, 长短轴之比为 $1.5:1\text{--}3:1$ 。CL 图像中, 核幔边结构明显。岩浆核具有韵律振荡环带, 多呈柱状自形, 半自形, 被变质锆石边所包裹, 边缘具明显的熔蚀结构。部分锆石具有继承碎屑核, 呈不规则粒状, 发育有岩浆环带或模糊的环带。变质锆石边阴极发光较强, 呈冷杉叶状、或弱分带, 与典型的变质锆石特征相似^[30-31]。部分变质锆石外围还有具有一圈阴极发光较弱的变质增生边, 无明显环带(图 2)。

本次研究对 30 颗锆石的不同微区进行了 36 个点的 LA-ICP-MS U-Pb 定年及微量元素含量测试, 其结果如(表 1,2)所示, U-Pb 测定结果可以分为 4 组(图 3a,b)。本次分析中 11 个分析点位于继

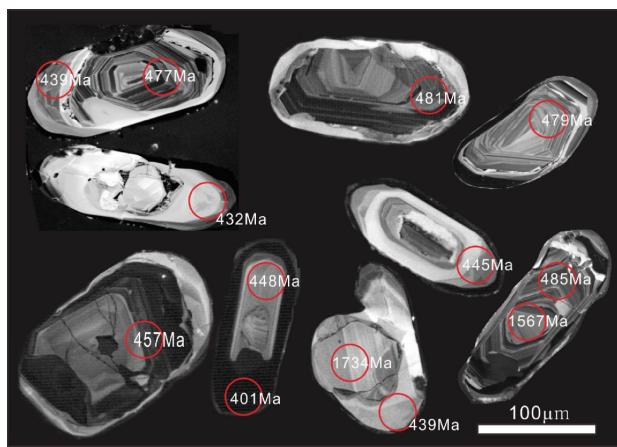


图2 锆石CL图像、测试点位及年龄

Fig. 2 Cathodoluminescence (CL) images, analytical spots and ages of the zircon grains

承的碎屑核区域,多数锆石分析点具有较谐和的年龄,年龄分布 550~2736 Ma。这组年龄对应的锆石 REE 总量较高, Σ REE 为 373~1442 $\mu\text{g/g}$, HREE 明显富集, 球粒陨石标准化模式配分图中显示 HREE 稀土富集的配分模式和相对明显的 Eu 负异常(图 3c), Th/U 值在 0.13~1.39 之间, 具有典型岩浆结晶锆石的特征^[30,32]。

对较自形的发育振荡环带的岩浆锆石区域分析了 10 个点, 均落在谐和线上或附近(图 3b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄值变化于 450~497 Ma(表 1)之间, 主要集中在 470~485 Ma 之间, 加权平均年龄为 $478 \pm 7 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.73$), 应代表原岩年龄的最佳估计值。这组年龄对应的锆石 REE 总量较高, Σ REE 为 296~726 $\mu\text{g/g}$, 球粒陨石标准化模式配分图中显示 HREE 富集的配分模式和相对明显的

Eu 负异常(图 3c), Th/U 值在 0.14~1.31 之间, 具有典型岩浆结晶锆石的特征^[30,32]。

位于变质锆石幔部的 13 个数据点均具有较和谐的年龄, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 423~450 Ma 之间, 加权平均年龄为 $437 \pm 7 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=1.3$, $n=10$)(图 3b), Th/U 值主要集中在 0.01~0.09 之间。该组锆石 REE 总量较低, Σ REE 为 4.69~102 $\mu\text{g/g}$, Eu 的负异常, 相对富集 HREE(图 3c)。

对较宽的锆石增生边进行了 4 个点的分析, 获得了较一致的谐和年龄, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化于 400~414 Ma 之间, 加权平均年龄为 $406 \pm 8 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.72$, $n=4$)(图 3b). , 该组锆石具有低的 Th/U 值 (0.01~0.08), REE 总量较低, Σ REE 为 32.2~181 $\mu\text{g/g}$, 富集 HREE, Eu 的负异常(图 3c)。

5 讨论及结论

5.1 原岩年龄及性质

样品中大部分锆石都显示核幔边结构。核部以岩浆韵律生长环带、相对高的 Th/U 值和微量元素含量、明显的 Ce 和 Eu 异常, 以及 HREE 富集为特征; 表明为原岩锆石。它们给出了不同程度谐和的年龄(表 1), 除两个较年轻的点(450 Ma 和 457 Ma)应该是 Pb 丢失所致, 没有明确的地质意义外, 其余的分析点主要集中在 470~497 Ma(表 1)之间, 加权平均年龄为 $478 \pm 7 \text{ Ma}$ ($\text{MSWD}=0.73$), 应代表原岩年龄的最佳估计值。这结果表明桐柏长英质麻粒岩原岩形成于早奥陶纪。此外, 长英质麻粒岩中锆石还含有大量继承碎屑锆石核, 年龄分布为 550~2736 Ma, 这些结果表明其原岩可能为 S 型花岗

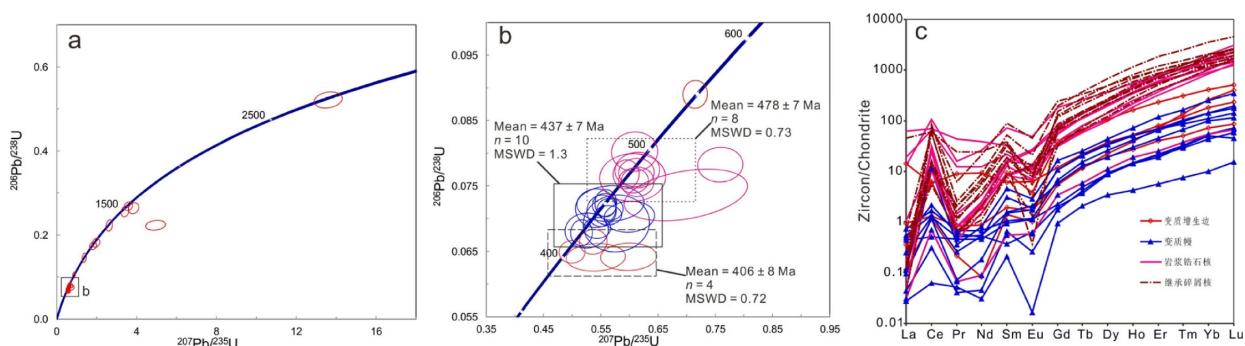


图3 锆石U-Pb谐和图(a,b)及球粒陨石标准化稀土元素分配图(c)

Fig. 3 Concordia diagrams of U-Pb dating (a, b) and Chondrite-normalized REE patterns (c) of zircon

表1 北桐柏造山带长英质麻粒岩LA-ICP-MS锆石U-Pb同位素测试结果
Table 1 Zircon U-Pb isotopic data obtained by LA-ICP-MS for felsic granulite from north Tongbai orogen

No.	锆石 结构	Th μg/g	U μg/g	Th/U	Ratio 1s $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Ratio 1s $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Ratio 1s $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	Ratio 1s $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	Age 1s $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	Age 1s $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$
01	增生边	14.8	350	0.04	0.0586	0.002	0.5368	0.0161	0.0665	0.0013
02	岩浆锆石	130	300	0.43	0.0589	0.001	0.6141	0.0191	0.0756	0.0015
03	变质锆石	27.6	419	0.07	0.0549	0.002	0.5413	0.0234	0.0716	0.0020
04	岩浆锆石	510	831	0.61	0.0562	0.001	0.5944	0.0150	0.0768	0.0015
05	变质锆石	6.00	69.5	0.09	0.0559	0.003	0.5255	0.0251	0.0682	0.0018
06	继承核	56.0	153	0.37	0.1061	0.003	3.8500	0.1069	0.2632	0.0053
07	岩浆锆石	267	523	0.51	0.0575	0.002	0.6138	0.0258	0.0774	0.0018
08	继承核	109	840	0.13	0.0600	0.001	0.8654	0.0232	0.1046	0.0027
09	继承核	247	533	0.46	0.0686	0.002	1.3757	0.0430	0.1455	0.0044
10	岩浆锆石	153	264	0.58	0.0704	0.002	0.7589	0.0262	0.0783	0.0018
11	变质锆石	25.8	307	0.08	0.0560	0.001	0.5564	0.0139	0.0721	0.0012
12	增生边	302	3384	0.09	0.0613	0.004	0.5413	0.0342	0.0641	0.0014
13	变质锆石	11.3	505	0.02	0.0619	0.002	0.6000	0.0290	0.0703	0.0016
14	增生边	40.2	521	0.08	0.0677	0.003	0.5986	0.0323	0.0642	0.0014
15	继承核	833	1553	0.54	0.0583	0.001	0.7149	0.0141	0.0890	0.0014
16	继承核	54.4	119	0.46	0.0755	0.002	1.8106	0.0722	0.1739	0.0036
17	增生边	26.8	374	0.07	0.0559	0.001	0.4998	0.0150	0.0649	0.0012
18	变质锆石	0.90	110	0.01	0.0575	0.001	0.5439	0.0155	0.0686	0.0011
19	变质锆石	24.5	82.8	0.30	0.0575	0.001	0.5663	0.0151	0.0714	0.0011
20	变质锆石	0.60	49.8	0.01	0.0579	0.001	0.5628	0.0158	0.0705	0.0010
21	继承核	217	156	1.39	0.1893	0.004	13.6031	0.2874	0.5212	0.0079
22	继承核	101	275	0.37	0.1610	0.006	4.9491	0.2051	0.2229	0.0047
23	变质锆石	7.10	142	0.05	0.0605	0.004	0.5773	0.0382	0.0693	0.0029
24	继承核	100	280	0.36	0.0970	0.002	3.5867	0.0847	0.2681	0.0043
25	岩浆锆石	423	323	1.31	0.0688	0.007	0.6985	0.0711	0.0736	0.0026
26	继承核	97.5	146	0.67	0.0857	0.002	2.6261	0.0654	0.2223	0.0054
27	变质锆石	31.4	931	0.03	0.0562	0.001	0.5515	0.0171	0.0712	0.0016
28	变质锆石	7.10	142	0.05	0.0569	0.004	0.5671	0.0388	0.0723	0.0018
29	继承核	136	245	0.55	0.0972	0.002	3.4194	0.0793	0.2553	0.0052
30	变质锆石	0.90	60.3	0.01	0.0552	0.001	0.5165	0.0126	0.0678	0.0015
31	岩浆锆石	116	812	0.14	0.0551	0.002	0.6092	0.0266	0.0802	0.0020
32	岩浆锆石	66.4	192	0.35	0.0581	0.001	0.6073	0.0172	0.0758	0.0013
33	岩浆锆石	103	289	0.36	0.0577	0.002	0.6124	0.0206	0.0771	0.0014
34	岩浆锆石	280	638	0.44	0.0560	0.001	0.5588	0.0126	0.0723	0.0014
35	岩浆锆石	91.9	167	0.55	0.0576	0.003	0.6058	0.0380	0.0763	0.0024
36	继承核	54.3	113	0.48	0.0786	0.003	1.9641	0.0805	0.1813	0.0043

表2 北桐柏造山带长英质麻粒岩LA-ICP-MS锆石微量元素结果($\times 10^{-6}$)Table 2 Zircon trace elements data obtained by LA-ICP-MS for felsic granulite from north Tongbai orogen($\times 10^{-6}$)

No.	锆石结构	Y	Nb	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Hf	Ta	Σ REE
01	增生边	76.2	0.81	0.03	0.72	0.02	0.04	0.21	0.06	1.12	0.43	5.84	2.19	11.8	3.45	44.9	10.0	9427	0.23	80.9
02	岩浆锆石	588	1.59	14.5	42.2	4.12	18.1	5.00	0.52	13.3	4.14	49.5	19.4	90.3	19.8	191	39.6	8265	0.95	512
03	变质锆石	84.2	0.44	0.17	1.03	0.06	0.32	0.16	0.07	1.39	0.58	6.60	2.40	10.6	2.47	24.4	4.92	8669	0.20	55.2
04	岩浆锆石	812	3.88	4.58	39.3	1.17	5.73	3.38	0.63	15.5	5.17	63.9	25.9	125	28.9	288	59.2	9384	2.11	666
05	变质锆石	23.3	0.26	0.13	0.84	0.02	0.25	0.06	0.04	0.41	0.14	2.17	0.82	3.13	0.79	8.62	1.15	8954	0.11	18.6
06	继承核	960	2.08	0.10	6.93	0.19	2.80	5.05	0.53	24.3	7.93	91.8	33.4	145	29.0	262	49.1	7278	0.63	659
07	岩浆锆石	820.4	2.43	0.03	17.67	0.08	1.15	2.53	1.60	16.17	5.15	62.03	24.91	120	28.0	296	68.7	6544	0.76	644
08	继承核	740	1.38	0.06	3.35	0.06	0.93	2.47	0.02	14.1	5.05	62.4	23.8	112	23.9	227	44.1	9813	1.17	519
09	继承核	1321	2.33	0.03	9.32	0.19	3.25	5.79	0.16	31.3	10.6	126	46.2	200	40.0	349	63.7	8538	1.25	886
10	岩浆锆石	691	0.96	0.25	8.76	0.14	1.59	2.42	0.80	11.8	4.23	51.8	21.2	102	24.5	254	56.9	7787	0.51	540
11	变质锆石	59	0.36	0.02	0.7	0.01	0.08	0.24	0.12	1.2	0.48	4.8	1.7	7	1.7	17	2.9	8473	0.13	38.4
12	增生边	299	2.46	0.08	3.90	0.05	0.89	1.42	0.22	7.96	2.50	26.6	9.39	37.9	7.81	69.3	12.8	10882	1.67	181
13	变质锆石	95.9	0.49	0.06	0.78	0.05	0.26	0.23	0.10	2.21	0.77	8.53	2.80	11.5	2.20	18.6	3.61	8476	0.45	51.7
14	增生边	111	0.70	3.45	3.56	0.84	4.32	0.91	0.36	2.47	0.83	9.39	2.93	13.2	3.01	31.1	6.03	8617	0.22	82.4
15	继承核	849	5.02	0.02	35.6	0.15	2.50	3.90	0.73	17.7	5.60	64.1	25.2	121	28.9	299	64.6	7371	1.57	669
16	继承核	1101	4.22	10.5	36.0	2.34	11.3	5.97	0.46	26.3	8.95	102	38.0	168	33.9	299	55.6	6951	1.48	799
17	增生边	53.5	0.34	0.23	0.79	0.08	0.40	0.29	0.10	1.25	0.44	4.95	1.57	6.69	1.29	12.0	2.14	8707	0.12	32.2
18	变质锆石	32	0.27	0.01	0.2	0.00	0.0	0.1	0.01	0.4	0.15	2.3	0.8	4	0.8	9	1.8	9962	0.11	19.6
19	变质锆石	130	0.58	0.03	6.84	0.03	0.39	0.69	0.16	3.34	0.94	11.0	4.1	19.4	4.2	42	8.9	9428	0.18	102
20	变质锆石	8.49	0.25	0.01	0.04	0.00	0.01	0.03	0.00	0.20	0.08	0.86	0.24	0.93	0.19	1.72	0.38	9082	0.07	4.69
21	继承核	1208	0.73	0.03	45.9	0.59	10.0	13.7	2.61	50.1	12.5	126	41.8	169	32.8	291	55.8	7301	0.30	852
22	继承核	436	0.94	0.03	8.71	0.07	0.65	1.32	0.76	7.19	2.47	31.2	13.21	67.5	16.06	180.3	44.08	7210	0.38	374
23	变质锆石	32.2	0.29	0.01	0.44	0.01	0.04	0.08	0.03	0.69	0.22	2.84	1.06	4.24	0.95	9.22	1.67	8765	0.14	21.5
24	继承核	504	3.15	0.07	9.92	0.06	0.51	1.24	0.08	6.74	2.74	37.3	16.5	85.2	20.9	219	44.9	10099	1.80	445
25	岩浆锆石	945	1.41	3.09	65.9	1.51	12.4	10.9	2.84	37.1	9.62	93.8	31.6	131	27.1	250	48.7	6966	0.61	726
26	继承核	1955	3.72	0.02	51.9	0.24	4.22	7.96	1.24	39.6	14.1	171	66.5	303	64.1	604	115	6663	1.01	1443
27	变质锆石	95.1	0.46	0.12	1.32	0.06	0.24	0.46	0.11	2.17	0.79	8.97	2.94	11.6	2.65	24.1	4.52	9399	0.50	60.0
28	变质锆石	32.2	0.29	0.01	0.44	0.01	0.04	0.08	0.03	0.69	0.22	2.84	1.06	4.24	0.95	9.22	1.67	8765	0.14	21.5
29	继承核	865	4.65	0.15	36.6	0.12	1.61	2.88	0.46	15.3	5.69	69.1	28.5	140	31.5	322	67.4	9494	1.35	722
30	变质锆石	29.4	0.23	0.11	0.31	0.04	0.21	0.14	0.07	0.46	0.18	2.25	0.82	3.49	0.74	7.34	1.46	8407	0.07	17.6
31	岩浆锆石	400	0.91	0.00	7.33	0.07	1.05	1.23	0.69	7.00	2.32	28.7	12.1	62.0	16.2	173	41.7	7888	0.49	353
32	岩浆锆石	345	0.73	0.01	6.34	0.06	0.98	1.32	0.74	6.51	2.14	25.0	10.8	52.6	13.0	142	34.7	6737	0.28	297
33	岩浆锆石	452	1.64	0.04	14.9	0.04	0.70	1.27	0.40	8.05	2.95	35.7	14.2	68.8	15.6	154	32.1	8241	0.85	349
34	岩浆锆石	875	2.60	0.01	19.7	0.07	1.17	2.25	1.46	14.1	5.20	65.2	26.8	134	32.0	344	78.9	7246	0.80	725
35	岩浆锆石	643	0.58	0.08	7.73	0.08	0.85	2.00	0.41	11.0	4.26	52.8	21.1	96.2	20.9	191	37.0	8005	0.28	446
36	继承核	603	0.81	0.01	7.45	0.10	1.90	2.86	0.32	13.2	4.49	54.5	20.3	91.6	20.7	204	38.6	8156	0.33	460

岩。

5.2 麻粒岩相变质事件

锆石 U-Pb 年代学是对高级变质岩石进行定年使用最广泛和精度最高的年代学方法。但是,最近的研究表明,变质锆石可以在变质过程中通过生长或重结晶形成于不同的阶段^[33]。关于桐柏造山带麻粒岩相变质作用的时间长期以来一直存在争议^[1,9,21]。通过单颗粒锆石蒸发法获得的 435 ~ 470 Ma 的年龄^[1]和 470 ~ 480 Ma 的年龄^[9]可能并不能代表麻粒岩相变质作用的年龄,因为这种方法很难揭示复杂锆石的年龄。Zhai et al. (1998)获得的一个 404 Ma 的角闪岩 Ar-Ar 年龄,被认为是冷却阶段的年龄^[21]。最近,原位锆石 U-Pb 定年结果表明桐柏造山带中麻粒岩样品中变质锆石的 U-Pb 年龄集中在约 440 ~ 394 Ma^[8,11,21,23]。440 Ma 的变质锆石具有明显的负 Eu 异常, Th/U 比值和 HREE 含量变化大,其可能代表了前进变质年龄^[8],而不是麻粒岩相峰期变质年龄^[21]。桐柏麻粒岩中独居石 U-Pb 定年获得了 426 ± 5 Ma 的年龄,并被解释为峰期变质年龄^[24]。这与锆石 U-Pb 定年得到的 430 Ma 左右的峰期变质年龄在误差范围内一致^[8,11,23]。退变质年龄被限定在 415 Ma 左右。

本文获得在变质锆石区域的分析点获得²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 437 ± 7 Ma (MSWD=1.3, n=10),这些锆石具有相对低的 HREE 含量,但明显富集重稀土,Eu 负异常明显,这指示锆石结晶时,石榴石含量少甚至缺失,这与桐柏长英质麻粒岩峰期富含石榴石的特征不符,因此该年龄可能代表了前进变质阶段的年龄。本文获得的锆石增生边的年龄 406 ± 8 Ma,前人在桐柏麻粒岩中也报道有 410 ~ 394 Ma 的锆石年龄,这些年龄与该地区角闪石 Ar-Ar 年龄相似^[9]。因此该年龄被解释为麻粒岩冷却到约 500 °C 时的退变年龄。

5.3 构造意义

桐柏造山带中麻粒岩相变质作用的构造背景还存在争议。部分研究者认为桐柏麻粒岩相变质是二郎坪弧后盆地向南俯冲导致的^[1,34]。而另一方面,部分学者认为商丹洋向北俯冲是桐柏麻粒岩相变质作用可能的构造背景^[8,10-11,23,35-36]。在北秦岭群中发育有一条 400 ~ 450 Ma 的具有岛弧特征的岩浆岩带。北秦岭群中强烈的混合岩化作用也发生在 400 ~ 450 Ma^[8,31-37]。然而,在南秦岭地体中未见报道

有同时期的麻粒岩相变质、岩浆作用、混合岩化作用。因此,根据以上结果表明可能是商丹洋向北俯冲导致北秦岭群中的麻粒岩相变质、岩浆作用和混合岩化作用。

本文获得桐柏长英质麻粒岩的原岩年龄为 478 ± 7 Ma (MSWD=0.73)。同时,志留纪花岗岩和片麻岩中继承锆石核给出的 U-Pb 年龄范围 440 ~ 2635 Ma,大量的年龄集中在约 450 ~ 490 Ma^[8,10]。这些年龄与北桐柏和秦岭造山带早古生代弧岩浆作用一致^[38],可能是早古生代大洋俯冲形成的岛弧 - 弧后系统的结果^[1,39]。最年轻一组的碎屑锆石年龄²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均为 450 ± 5 Ma,被解释为原岩沉积作用的最大年龄^[8]。这表明岩浆作用伴随着快速侵蚀、沉积,并经历高温 - 超高温变质作用。

该造山带普遍出露晚奥陶 - 志留纪花岗岩和镁铁质侵入体^[34,37-38,40]。镁铁质岩石的特征为富集 LILEs,亏损的 HFSEs,和高的正全岩 ϵ Nd(t) (3.76 ~ 5.68) 值以及锆石 ϵ Hf(t) (5.1 ~ 12.1) 值^[8,38,40]。地球化学特征表明这些镁铁质岩浆物质来源于新生的岩石圈地幔。结合同时代的真正的 ϵ Nd(t) 的花岗岩,表明北桐柏造山带在志留纪时期存在明显的地壳的生长和改造过程^[8]。

基于以上讨论,我们认为在 480 Ma 时,商丹洋已开始向北俯冲,导致 ~ 480 Ma 左右的岩浆作用,由于持续的俯冲消减,在 440 ~ 420 Ma 时,洋中脊与弧交汇,发生洋脊俯冲导致志留纪高温 - 超高温麻粒岩相变质作用、岩浆作用的发生。

参考文献:

- [1] Kröner A, Zhang G W, Sun Y. Granulites in the Tongbai area, Qinling belt, China: geochemistry, petrology, single zircon geochronology, and implications for the tectonic evolution of Eastern Asia [J]. Tectonics, 1993, 12(1): 245–255.
- [2] Li S G, Xiao Y L, Liu D L, Chen Y Z, Ge N J, Zhang Z Q, Sun S S, Cong B L, Zhang R Y, Hart S R, Wang S S. Collision of the North China and Yangtze Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: Timing and processes [J]. Chemical Geology, 1993, 109:89–111.
- [3] Wu Y B, Hanchar J M, Gao S, Sylvester P J, Tubrett M, Qiu H N, Wijbrans J R, Brouwer F M, Yang S H, Yang Q J, Liu Y S, Yuan H L. Age and nature of eclogites in the Huwan shear zone, and the multi stage evolution of the Qinling-Dabie-Sulu orogen, central China [J]. Earth and Planetary Science

- Letters, 2009, 277: 345–354.
- [4] Wu Y B, Zheng H F. Tectonic evolution of a composite collision orogen: An overview on the Qinling–Tongbai–Hong’ an–Dabie–Sulu orogenic belt in central China [J]. Gondwana Research, 2013, 23:1402–1428.
- [5] Zheng Y F, A perspective view on ultrahigh-pressure metamorphism and continental collision in the Dabie–Sulu orogenic belt [J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53 (20): 3081–3104.
- [6] Zheng Y F, Fu B, Gong B, Li L. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie–Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime [J]. Earth Science Reviews, 2003, 62:105–161.
- [7] 杨经绥, 刘福来, 吴才来, 万渝生, 张建新, 史仁灯, 陈松永. 中央碰撞造山带中两期超高压变质作用来自含柯石英错石的定年证据[J]. 地质学报, 2003, 77(4): 465–477.
- [8] Wang H, Wu Y B, Gao S, Zhang H F, Liu X C, Gong H J, Peng M, Wang J, Yuan H L. Silurian granulite-facies metamorphism, and coeval magmatism and crustal growth in the Tongbai orogen, central China [J]. Lithos, 2011, 125: 249–271.
- [9] Zhai X M, Day H W, Hacker B R, You Z D. Paleozoic metamorphism in the Qinling Orogen, Tongbai Mountains, central China [J]. Geology, 1998, 26(4): 371–374.
- [10] Liu X C, Jahn B M, Hu J, Li S Z, Liu X, Song B. Metamorphic patterns and SHRIMP zircon ages of medium- to high-grade rocks from the Tongbai orogen, central China: implications for multiple accretion/collision processes prior to terminal continental collision [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2011, 29:979–1002.
- [11] Xiang H, Zhang L, Zhong Z Q, Santosh M, Zhou H W, Zhang H F, Zheng J P, Zheng S. Ultrahigh-temperature metamorphism and anticlockwise PT path of Paleozoic granulites from north Qinling–Tongbai orogen, Central China [J]. Gondwana Research, 2012, 21:559–576.
- [12] 张翠光, 魏春景, 张阿利, 邱林. 河南桐柏地区麻粒岩的岩石学特征及其成因意义 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(4): 63–69.
- [13] 张国伟, 孟庆任, 于在平, 孙勇, 周鼎武, 郭安林. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征 [J]. 中国科学 (D辑), 1996, 26 : 193–200.
- [14] 张宗清, 刘敦一, 付国民. 北秦岭变质地层同位素年代学研究[M]. 北京: 地质出版社, 1994:75–105.
- [15] 卢欣祥, 董有, 肖庆辉, 等. 秦岭花岗岩大地构造图[M]. 西安: 西安地图出版社, 2000.
- [16] Diwu, C R, Sun Y, Zhang H, Wang Q, Guo A L, Fan L G. Episodic tectonothermal events of the western North China Craton and North Qinling Orogenic Belt, in central China: constraints from detrital zircon U–Pb ages [J]. Journal of Asian Earth Science, 2012, 47: 107–122.
- [17] Zhu X Y, Chen F K, Li S Q, Yang Y Z, Nie H, Siebel W, Zhai M G. 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, 2011, 20(1):194–204.
- [18] Liu X C, Jahn B M, Li S Z, Liu Y S. U–Pb zircon age and geochemical constraints on tectonic evolution of the Paleozoic accretionary orogenic system in the Tongbai orogen, central China [J]. Tectonophysics, 2013, 599: 67–88.
- [19] 孙勇, 卢欣祥, 韩松, 张国伟, 杨司祥. 北秦岭早古生代二郎坪蛇绿岩片的组成和地球化学[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26 (增刊) : 49–55.
- [20] Zhang H F, Gao S, Zhang L, Zhong Z Q, Ling W L, Wang L S. Granulite genesis and tectonic evolution in Tongbai area : single zircon evaporationages and Nd isotopic geochemistry [J]. Journal of China University of Geosciences, 1998, 9(3): 174–179.
- [21] 翟淳, 林金辉, 龚夏生. 豫南高压麻粒岩中富钛角闪石类的成因和意义[J]. 矿物学报, 1999, 19 (1) : 63–69.
- [22] 张翠光, 魏春景, 张阿利, 邱林. 河南桐柏地区麻粒岩和片麻岩的岩石学特征及其成因意义 [J]. 矿物岩石, 2003, 23(4): 63–69.
- [23] Xiang H, Zhong Z Q, Li Y, Qi M, Zhou H W, Zhang L, Zhang Z M, Santosh M. Sapphirine-bearing granulites from the Tongbai orogen, China: Petrology, phase equilibria, zircon U–Pb geochronology and implications for Paleozoic ultrahigh temperature metamorphism [J]. Lithos, 2014 , 208–209: 446–461.
- [24] Wu Y B, Wang H, Gao S, Hu Z C, Liu X, Gong H J. LA-ICP-MS monazite U–Pb age and trace element constraints on the granulite-facies metamorphism in the Tongbai orogen, central China [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 82: 90–102.
- [25] 钟增球, 索书田, 张利, 等. 岩石塑性流变学—大别—苏鲁高压超高压变质带构造学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2007:155.
- [26] Yuan H L, Gao S, Liu X M, Li H M, Gunther D, Wu F Y. Accurate U–Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation–inductively coupled plasma–mass

- spectrometry [J]. *Geoanalytical and Geostandard Newsletters*, 2004, 28(3): 353–370.
- [27] Liu X M, Gao S, Diwu C R, Yuan H L, Hu Z C. Simultaneous in-situ determination of U-Pb age and trace elements in zircon by LA-ICP-MS in 20 μm spot size [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(9): 1257–1264.
- [28] Andersen T. 2002. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report 204Pb [J]. *Chemical Geology*, 192(1–2): 59–79.
- [29] Ludwig K R. User's manual for Isoplot 3.00: a geochronological toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley Geochronological Center Special Publication, 2003, (4): 25–32.
- [30] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry; partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. *Chemical Geology*, 2002, 184 (1–2): 123–138.
- [31] Wu Y B, Zheng Y F. Genesis of zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(16): 1554–1569.
- [32] 吴元保, 郑永飞. 锆石成因矿物学研究及其对U-Pb年龄解释的制约[J]. 科学通报, 2004, 49: 1589–1604.
- [33] Harley S L, Kelly N M, M?ller A. Zircon Behaviour and the Thermal Histories of Mountain Chains [J]. *Elements*, 2007, 3: 25–30.
- [34] Xue F, Kr?ner A, Reischmann T, Lerch F. Paleozoic pre- and post-collisional calc-alkaline magmatism in the Qinling orogenic belt, central China, as documented by zircon ages on granitoid rocks [J]. *Journal Geological Society*, 1996, 153 (3): 409–417.
- [35] Ratschbacher L, Hacker B R, Calvert A, Webb L E, Grimmer J C, McWilliams M O, Ireland T, Dong S W, Hu J M. Tectonics of the Qinling (Central China): tectonostratigraphy, geochronology, and deformation history [J]. *Tectonophysics*, 2003, 366: 1–53.
- [36] Hacker B R, Ratschbacher L, Liou J G. Subduction, collision and exhumation in the ultrahigh-pressure Qinling-Dabie orogen [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2004, 226: 157–175.
- [37] Dong Y P, Zhang G W, Neubauer F, Liu X M, Genser J, Hauzenberger C. Tectonic evolution of the Qinling orogen, China: review and synthesis [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41: 213–237.
- [38] 江思宏, 聂凤军, 方东会, 刘翼飞, 张万益, 许东青, 张志军. 河南桐柏围山城地区主要金银矿床的成矿年代学研究[J]. 矿床地质, 2009, 28(1): 63–72.
- [39] Sun Y, Lu X X, Han S, Zhang G W. Composition and formation of Palaeozoic Erlangping ophiolitic slab, North Qinling: Evidence from geology and geochemistry [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39 (S1): 50–50.
- [40] Wang H, Wu Y B, Qin Z W, Zhu L Q, Liu Q, Liu X C, Gao S, Wijbrans J R, Zhou L, Gong H J. Age and geochemistry of Silurian gabbroic rocks in the Tongbai orogen, central China: Implications for the geodynamic evolution of the North Qinling arc–back-arc system [J]. *Lithos*, 2013, 179: 1–15.