

北秦岭榴辉岩及相关岩石年代学的进一步确定及其对板片俯冲属性的约束

陈丹玲, 刘良

西北大学 大陆动力学国家重点实验室; 西北大学 地质学系, 陕西 西安, 710069

Chen Danling, Liu Liang

State Key Laboratory of Continental Dynamics; Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Chen Danling, Liu Liang. New data on the chronology of eclogite and associated rock from Guanpo Area, North Qinling orogeny and its constraint on nature of North Qinling HP-UHP eclogite terrane. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(2): 158-169

Abstract: Based on the investigation of petrography and zircon CL imaging, LA-ICP-MS trace elements and U-Th-Pb isotope analyses were carried out on zircon grains of UHP eclogite and associated garnet amphibolite from Guanpo area, the North Qinling orogeny. Zircon LA-ICP-MS dating yields metamorphic age of (502 ± 11) Ma, protolith age of $> (657 \pm 18)$ Ma for the eclogite, and protolith age of (791 ± 6) Ma, metamorphic age of $(487-503)$ Ma and amphibolite facies retrograde metamorphic age of (366 ± 4) Ma for the garnet amphibolite. Geochemical studies show that the garnet amphibolite from the Guanpo area have characteristics of low Si (SiO_2 49.16%—50.78%) and high Ti (TiO_2 ranging from 2.28% to 2.83%), rich in LREE, LILE, most HFSE and without any depletion of Nb and Ta, showing the feature of within plate basalts (WPB). These geochemical characteristics are the same as those of the adjacent UHP eclogite in this area. Combined the geochemical data with the field occurrence, petrographic features and chronological results, it suggests that the garnet amphibolite resulted from the recrystallization of the UHP eclogite under amphibolite facies during exhumation. Therefore, the ages of (502 ± 11) Ma, (791 ± 6) Ma and (366 ± 4) Ma obtained from eclogite and garnet amphibolite should represent the metamorphic, the protolith and the retrograde metamorphic age of Qinling UHP eclogite, respectively. The metamorphic age of (502 ± 11) Ma of eclogite is consistent with that of its country rock pelitic gneiss $((507 \pm 38)$ Ma) and UHP felsic gneiss in Songshugou area (485—514 Ma) of the North Qinling. These nearly identical metamorphic ages suggest that the Guanpo eclogite and their host gneisses as well as the Songshugou UHP felsic gneiss underwent the same metamorphism during the Early Paleozoic. Additionally, the metamorphic age of (502 ± 11) Ma is nearly 300 Ma younger than that of the protolith age of (791 ± 6) Ma for eclogite; these age data together with the WPB characters of the protolith of eclogite suggest that the North Qinling UHP eclogite may not be the product of Paleozoic oceanic crust deep subduction but the Neoproterozoic oceanic crust or rift igneous rocks subducted with country rocks into deep mantle during the Paleozoic.

Key words: North Qinling; ultrahigh-pressure metamorphic eclogite; LA-ICP-MS zircon dating; geochemistry; continental crust deep subduction

收稿日期: 2010-11-20; 修回日期: 2011-01-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2009CB825003); 国家自然科学基金项目(41072051); 西北大学大陆动力学国家重点实验室基金项目

作者简介: 陈丹玲(1967—), 女, 教授, 矿物学、岩石学、矿床学专业。E-mail: dlchen@nwnu.edu.cn

摘要:在岩相学观察和锆石 CL 图像研究的基础上, 利用 LA-ICP-MS 原位分析方法, 对北秦岭官坡超高压榴辉岩和伴生的石榴石角闪岩(榴闪岩)进行了详细的锆石微区微量元素和 U-Th-Pb 同位素分析, 在榴辉岩样品中得到变质年龄为 (502 ± 11) Ma, 原岩结晶年龄 $> (657 \pm 18)$ Ma; 在榴闪岩样品中得到原岩结晶年龄为 (791 ± 6) Ma, 变质年龄为 487~503 Ma, 角闪岩相退变质年龄为 (366 ± 4) Ma。岩石地球化学研究显示, 北秦岭官坡地区的榴闪岩具有低 Si (SiO_2 质量分数为 49.16%~50.78%), 高 Ti (TiO_2 质量分数为 2.28%~2.83%)、富集 LREE、LILE 和大部分的 HFSE 元素, 不显 Nb、Ta 负异常的板内玄武岩特征, 与北秦岭超高压榴辉岩地球化学特征一致。结合两者的野外产状、岩相学特征、锆石形貌和年代学研究结果, 表明本文研究的官坡地区的榴闪岩是超高压榴辉岩在抬升过程中在角闪岩相条件下退变质的产物。综合两者的年代学研究结果, 得到北秦岭地区超高压榴辉岩的变质年龄为 (502 ± 11) Ma, 原岩结晶年龄为 (791 ± 6) Ma, 角闪岩相退变质年龄为 (366 ± 4) Ma。研究得到的 (502 ± 11) Ma 的榴辉岩相变质年龄与前人得到的该榴辉岩围岩超高压泥质片麻岩的变质年龄 (507 ± 38) Ma 以及北秦岭松树沟地区的超高压长英质片麻岩的变质年龄 485~514 Ma 一致, 表明它们经历了同期超高压变质作用。而且, 榴辉岩 (502 ± 11) Ma 的变质年龄与其原岩的结晶年龄 (791 ± 6) Ma 存在近 300 Ma 的时间间隔, 表明原岩具有板内玄武岩性质的北秦岭官坡超高压榴辉岩不可能是秦岭古生代大洋板块深俯冲的产物, 而可能是已构造就位的古洋壳或裂谷火山岩在古生代随陆壳一起发生大陆深俯冲作用的产物。

关键词: 北秦岭; 超高压榴辉岩; LA-ICP-MS 锆石定年; 地球化学; 大陆深俯冲

中图分类号: P588.34; P597 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2321(2011)02-0158-12

近十多年来, 北秦岭构造带基础地质研究的重要进展之一是确定了秦岭群中原定的榴辉岩和长英质高压麻粒岩经历了超高压变质作用^[1-2]。随着中国东部大别—苏鲁三叠纪(220~240 Ma)典型大陆深俯冲型超高压变质带的深入研究^[3], 以及西部柴北缘和阿尔金古生代(阿尔金 480~500 Ma, 柴北缘 420~455 Ma)主体为陆壳深俯冲、柴北缘同时存在洋壳深俯冲^[4-16]等一系列研究成果的获得, 作为中国东、西部超高压变质地体过渡部位的北秦岭超高压带的形成时代和属性问题日益引起人们的普遍关注, 已成为解决中国东、西部超高压地体关系及探讨中国大陆地质问题的关键。

现已报道的北秦岭造山带的超高压变质岩石见于两个地区, 其中, 超高压长英质变质岩^[2]出露于陕西商南县松树沟一带, 空间上与本区已有高压基性麻粒岩^[17]和石榴石角闪岩共(伴)生, 各种定年方法给出它们的变质年龄为 485~514 Ma^[18-21]。超高压榴辉岩分布在河南卢氏县狮子坪以北的官坡—双槐树一线, 以超高压榴辉岩和石英云母片岩组合为特征^[1, 22-23]。早在北秦岭榴辉岩发现之初, 胡能高等^[24]

利用矿物全岩 Sm-Nd 等时线法得到 (400 ± 16) Ma 的年龄, 但解释为峰期之后的退变年龄; 2002 年杨经绥等利用 SHRIMP 方法给出榴辉岩及其围岩石英云母片岩的变质年龄分别为 (493 ± 170) Ma 和 (507 ± 38) Ma^[1], 并认为代表超高压峰期变质年龄。但这两个年龄的误差过大, 尤其是榴辉岩的年龄值误差高达士

170 Ma, 直接影响了对北秦岭超榴辉岩与松树沟超高压长英质片麻岩之间关系的探讨, 以及与中国东、西部超高压地体的对比研究。之后, 虽先后有该榴辉岩的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄值为 (505 ± 12) Ma 的报道^[11, 21], 但缺少锆石 CL 图像、微量元素组成及分析数据的详细报道。因而迄今为止, 关于北秦岭榴辉岩的峰期变质时代仍然缺乏精细的研究工作。另外, 已有地球化学研究表明, 秦岭群中超高压长英质片麻岩的原岩为陆缘沉积岩^[25], 因而, 松树沟超高压地体应为大陆深俯冲作用的产物; 而榴辉岩的原岩为具有洋壳性质的海山玄武岩^[26], 是否暗示这些超高压榴辉岩是大洋深俯冲作用的产物? 如果是, 它与围岩含金刚石泥质片麻岩以及松树沟地区的超高压长英质片麻岩的关系如何? 基于此, 本文重点利用 LA-ICP-MS 方法对北秦岭官坡地区的超高压榴辉岩及其退变的石榴角闪岩进行了详细的锆石原位 U-Pb 定年研究, 并结合岩石地球化学研究结果, 以期为准确定北秦岭超高压榴辉岩的形成时代及深俯冲板片的属性提供重要约束。

1 地质背景及岩石学特征

北秦岭造山带是指秦岭商丹断裂带与洛南—栾川—方城断裂带之间的秦岭北部区域, 其间又以多条断裂由南到北划分为宽坪群、二郎坪群、秦岭群和丹凤群(图 1)。秦岭群是北秦岭造山带的一个重要

的组成部分, 为一套中深变质杂岩系, 主体由片麻岩、角闪岩和大理岩组成, 变质程度为角闪岩相, 局部达麻粒岩相, 形成时代为古元古代(2 000 ~ 2 200 Ma), 经历新元古代(800 ~ 1 000 Ma)和早古生代的变质变形^[27]。二郎坪群分布在秦岭岩群以北、宽坪群以南, 其下部由弧后盆地型火山岩和蛇绿岩类岩石组成, 化石时代为奥陶纪—志留纪^[27], 最新获得其中基性火山岩的形成年龄为 463 ~ 474 Ma^[28-29]。丹凤群分布在秦岭岩群南侧, 构成分割南、北秦岭的缝合构造带, 是秦岭古生代洋盆闭合的产物, 主体具有以岛弧型火成岩为特点的镁铁质、超镁铁质岩石组合, 包含岛弧陆缘浊积岩系, 化石时代为奥陶纪—志留纪。宽坪群主要由一套变质变形的基性火山岩、碎屑岩和碳酸盐组成, 形成时代为中、新元古代(986 ~ 1 142 Ma)^[27]。

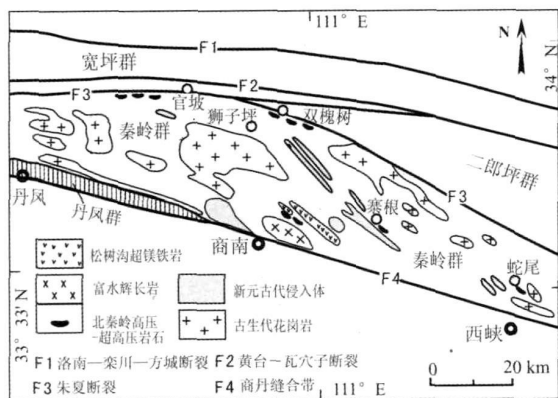


图 1 北秦岭地区地质简图

Fig 1 Simplified geological map of North Qinling

北秦岭地区的榴辉岩出露于秦岭岩群的北侧, 以朱夏断裂与其北侧的二郎坪群相隔, 其中以官坡地区出露的最为典型。榴辉岩最早发现于 1994 年^[22], 随后又报道在其中的石榴石和绿辉石中发现了柯石英及其假象包体^[23], 但由于没有提供确切的显微照片和拉曼光谱证据, 一直未得到广泛认可。直到 2002 年, 杨经绥等报道在榴辉岩及其围岩片麻岩锆石中发现微粒金刚石^[1], 北秦岭榴辉岩作为超高压变质作用的产物才引起大家的广泛关注。

野外可见榴辉岩主要呈透镜体状、团块状或似层状产于秦岭群各类副变质的片岩之中, 以含石榴石多硅白云母片岩、含石榴多硅白云母钠长片岩、含石榴多硅白云母石英片岩为主, 另有少量石榴角闪岩(榴闪岩)和石榴斜长角闪岩。剖面上可见榴辉岩、榴闪

岩和石榴斜长角闪岩呈过渡关系, 榴辉岩多出现在透镜体(团块)的中心, 向外渐变为榴闪岩、石榴斜长角闪岩。岩相学研究显示榴辉岩—榴闪岩和斜长角闪岩的矿物组成和组构亦呈现明显过渡关系, 指示由榴辉岩到榴闪岩再到斜长角闪岩的退变过程^[30]。

本文研究的榴辉岩与榴闪岩采于官坡地区, 剖面上两者无明显界限, 呈过渡关系。其中, 榴辉岩较新鲜, 呈灰绿色, 块状构造, 粒状变晶结构, 主要组成矿物为石榴石(40%)、绿辉石(45%)、角闪石(5%)、金红石(3%)、石英(2%)、斜长石(2%), 副矿物有榍石、磷灰石、锆石等。榴闪岩在露头上亦呈灰绿色—暗绿色, 中粗粒粒状变晶结构, 块状构造, 主要由角闪石(45% ~ 50%)、石榴子石(40%)、斜长石(10% 土)和石英组成, 个别角闪石中可见到少量辉石残留。

2 分析方法

本文所有的测试均在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成。定年样品首先进行锆石单矿物分离, 并在双目显微镜下将挑选出来的锆石镶嵌在环氧树脂中, 待固化后抛光至锆石颗粒的一半, 然后进行锆石的光学和阴极发光(CL)图像观察, 最后在 Agilent 7500a 型 ICP-MS 和德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(工作物质 ArF, 波长 193 nm)以及 MicroLas 公司的 GeoLas 200 M 光学系统的联机上微量元素分析和 U-Pb 年龄测定。LA-ICP-MS 分析的激光束斑直径为 30 μm , 激光剥蚀样品的深度为 20 ~ 40 μm 。锆石年龄采用国际标准锆石 91 500 作为外标标准物质, 元素含量采用 NIST SRM610 作为外标,²⁹Si 作为内标。单点分析的相对标准偏差(RSD)除 Be(4.4%)、P(3.9%)、Zn(4.5%)和 Sb(7.2%)较高外, 对于大多数元素 RSD 为 1% ~ 2.6%。同位素测定时, 普通铅根据 Andersen Tom 的 3D 坐标法进行校正^[31], 样品的同位素比值及元素含量计算采用 GLITTER(ver 4.0, Macquarie University)程序, 年龄计算及谐和图的绘制用 Isoplot(ver 2.49)完成。详细测试流程见文献[13], 数据处理方法见文献[32]。

全岩的主量元素是将样品制成碱熔玻璃片, 然后在日本理学 RIX2100 XRF 仪上测定。测定时经 BCR-2 和 GBW07105 标样监控, 元素分析误差 < 5%。微量元素测定在美国 Perkin Elmer 公司 Elan 6100DRC ICP-MS 上进行, 详细的分析方法见文献[33]。样品测试过

程经 AVG-1、BCR-1 和 BHV-1 国际标样监控,并作空白样进行质量监控。Co、Ni、Zn、Ga、Rb、Y、Zr、Nb、Hf、Ta 和 REE(除 Hf 和 Lu) 等元素分析精度优于 5%, 其他低浓度元素的分析精度为 5%~10%。

3 定年结果

3.1 榴辉岩

榴辉岩中的锆石呈浑圆柱状形态(图 2a), 内部呈斑杂状或均匀无结构, 部分颗粒核部可见继承性岩浆锆石残留, 边部显示面状、云雾状或扇状的变质锆石结构特征。

原位微量元素分析显示(表 1, 图 2a), 锆石核部和边部稀土组成存在差异, 其中核部测点的稀土总量、重稀土含量、 Yb_{CN}/Gd_{CN} 比值分别为 $(31.51 \sim 138.53) \times 10^{-6}$ 、 $(30.35 \sim 137.94) \times 10^{-6}$ 和 $29.20 \sim 748.29$, 并显示重稀土富集型稀土配分模式和相对明显的 Eu 负异常(图 2a), Th/U 比值多大于 0.2(表 2); 边部测点的稀土总量、重稀土含量和 $(Yb/Gd)_{CN}$ 比值分别为 $(12.35 \sim 57.83) \times 10^{-6}$ 、 $(6.32 \sim 54.40) \times 10^{-6}$ 和 0.73~25.04, 均明显低于核部测点, 并显示重稀土近平坦型的稀土曲线形态(图 2a), Th/U 比值多小于 0.15(表 2), 指示其变质成因特征。

锆石的定年结果(表 2)在 $^{206}Pb/^{238}U$ ~ $^{207}Pb/^{235}U$

表 1 北秦岭官坡榴辉岩和石榴石角闪岩锆石的稀土元素组成

Table 1 REE composition of zircon grains from eclogite and garnet amphibolite in Guanpo Area, North Qinling															
测点 及位置	$w_B/10^{-6}$														
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	ΣREE
榴辉岩															
1 1r	0.1	0.138	0.119	0	0.19	0.176	0.61	0.286	4.56	1.02	5.75	0.88	9.46	1.27	24.56
1 2c	0.017	0.021	0	0.122	0.103	0.032	0.15	0.147	2.6	1.94	16.61	6.31	89.08	21.4	138.53
2 1r	0.077	0.283	0.077	0.23	0.37	0.173	1.61	0.62	10.42	2.96	12.3	2.07	20.58	2.97	54.74
2 2c	0.004	0.346	0.003	0.024	0.133	0.084	0.89	0.457	7.25	3.94	21.34	6.06	75.7	17.82	134.05
3 1r	0.26	0.39	0.034	1.51	0.5	0.23	2.4	0.71	3.3	0.54	0.76	0.146	1.42	0.149	12.35
4 1r	0.095	0.67	0.032	0.56	1.14	0.21	1.72	0.76	4.31	1.14	2.94	0.4	3.49	0.76	18.23
5 1r		0.73	0.101	1.25	0.24		0.79	0.38	5.97	1.43	4.71	0.66	4.67	1.02	21.95
5 2c	0.143	0.096					0.18	0.149	1.97	1.4	11.21	3.54	52.77	12.64	84.1
6 1r		0.78	0.155	0.91	0.79	0.23	1.08	0.42	4.36	1.59	3.96	0.77	10.67	1.11	26.83
6 2c	0.017	0.078			0.12	0.037	0.62	0.287	3.84	1.48	5.82	1.45	14.56	3.2	31.51
7 1r	0.036	0.299	0.048		0.61	0.19	1.02	1.23	12.48	3.51	12.49	2.05	20.81	3.06	57.83
8 1r		0.277	0.015	0.071	0.16	0.189	1.47	0.679	7.76	2.58	9.17	1.78	14.66	2.43	41.24
8 2c		0.157	0.004			0.045	0.18	0.163	1.91	1.02	4.85	1.41	19.08	4.4	33.22
榴闪岩															
1 1r	0.02	0.12	0.01	0.15	0.11	0.06	1.33	0.67	8.91	3.4	15.24	3.17	31.64	5.91	70.75
2 1m	0.02	0.31	0.02	0.12	0.14	0.1	1.18	0.49	7.65	3.76	22.1	5.65	70.15	16.85	128.54
3 1m	0.14	1.16	0.11	0.97	0.82	0.18	5.11	2.83	43.42	19.62	102.54	24.02	250.4	48.01	499.33
3 2c	1.53	11.97	1.25	11.69	11.03	0.96	38.03	12.56	142.62	52.43	220.37	45.58	426.58	75.23	1051.83
5 1r	0.01	0.9	0.01	0.24	0.55	0.33	4.38	1.55	17.74	5.95	22.66	4.52	38.05	6.69	103.59
6 2c	0.45	15.28	0.45	2.99	3.95	0.95	14.27	4.37	53.6	20.27	96.95	23.04	245.23	50.2	532
7 1c	0.09	15.71	0.16	1.82	4.32	0.95	17.2	5.37	56.98	20.73	91.78	19.97	194.61	37.7	467.38
9 1m	0.03	0.32	0.02	0.17	0.18	0.07	1.83	0.89	14.13	6.39	33.81	8.85	100.09	22.42	189.19
9 2m	0.02	0.28	0.01	0.07	0.15	0.12	1.96	1.16	16.61	7.14	38.78	9.83	111.01	25.11	212.24
11 1c	0.04	10.96	0.08	0.88	2.58	0.64	17.32	8.16	103.38	37.11	145.62	25.9	226.37	38.26	617.3
12 1r	0.03	0.27	0.02	0.16	0.26	0.15	1.59	0.53	5.43	1.76	7.2	1.31	13.04	2.14	33.88
12 2c	0.03	13.09	0.18	2.75	4.71	1.27	22.25	7.16	79.36	29.42	128.69	27.02	263.17	51.08	630.17
13 1m	0.02	0.34	0.02	0.11	0.13	0.08	1.48	0.71	9.37	3.91	18.39	4.24	44.21	8.68	91.68
13 2c	0.02	1.32	0.02	0.34	1.21	0.21	8.4	3.24	37.85	11.83	51.52	10.86	107.91	21.42	256.15
14 1c	0.02	1.7	0.02	0.41	1.24	0.11	7.83	3.17	34.37	11.34	46.81	9.69	95.68	18.19	230.58
16 1r	0.02	6.47	0.02	0.54	1.21	0.49	4.79	1.77	22.32	9.76	49.8	12.27	145.48	35.03	289.97
16 2m	0.03	0.08	0.02	0.14	0.1	0.13	1.03	0.63	5.28	1.46	4.24	0.77	7.11	1.54	22.55
17 1r	0.25	1.85	0.22	2.11	1.95	0.39	10.95	3.97	38.76	12.01	49.13	10.29	100.53	20.51	252.91
18 2c	0.01	2.8	0.06	1.26	3.98	0.44	23.88	9.07	94.23	32.4	136.83	29.55	294.26	58.64	687.41
18 1r	0.02	0.31	0.01	0.14	0.27	0.09	1.9	0.96	11	4.02	17.44	3.83	40.1	8.01	88.09
19 1r	0.02	6.51	0.09	1.44	2.06	0.96	8.09	3.18	40.77	17.22	84.55	20.1	228.78	50.98	464.75
20 1c	0.34	6.93	0.33	3.06	2.82	0.89	11.68	4.04	55.35	22.21	107.41	24.13	251.76	51.51	542.45
22 1c	0.02	9.12	0.02	0.32	1.14	0.2	6.3	2.59	34.69	15.33	81.22	19.7	228.24	46.85	445.74
23 1c	0.01	1.16	0.02	0.58	1.31	0.23	10.43	3.9	39.35	12.3	47.97	10.18	100.92	20.01	248.37

谐和图上构成了一条不一致曲线, 下交点年龄为 11) Ma (MSWD= 0.35, 2σ), 该年龄应代表榴辉岩的变质年龄。另有一个核部测点的谐和年龄为(657 ±16) Ma, 而且, 在下交点处有 19 个测点形成了一个年龄集中区, ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为(502 ± ±18) Ma, 为经过改造的原岩年龄。

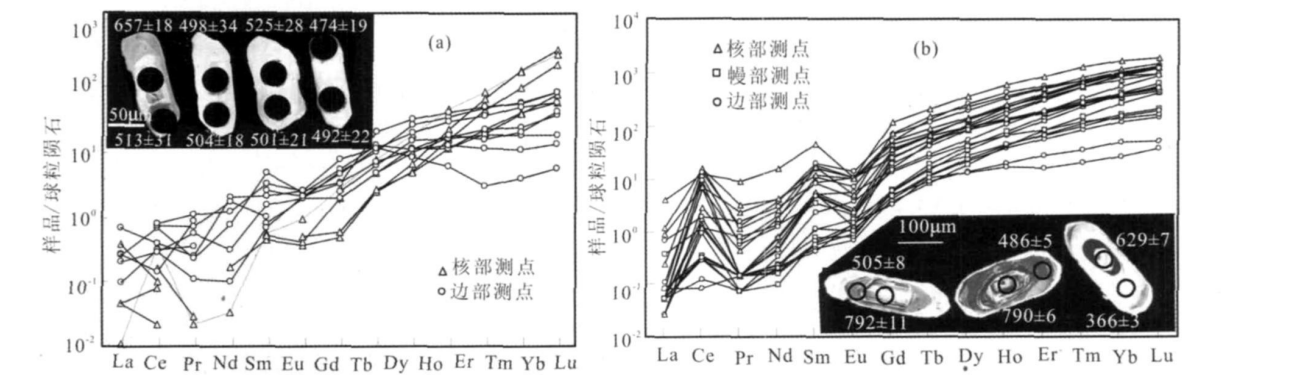


图 2 北秦岭榴辉岩 (a) 和榴闪岩 (b) 锆石的 CL 图像和球粒陨石标准化稀土配分图
Fig. 2 CL images and chondrite normalized REE diagrams of zircon grains from eclogite (a) and garnet amphibolite (b) in Guanpo area, the North Qinling

表 2 榴辉岩锆石的 LA-ICP-MS 分析结果

Table 2 LA-ICP-MS analytical data for zircon grains from eclogite in Guanpo Area, North Qinling														
测点	$w_B/10^{-6}$		Th/U	同 位 素 比 值						年龄/ Ma				
	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	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	
1. 1	2. 00	20. 52	0. 10	0. 046 05	0. 017 64	0. 461 04	0. 174 69	0. 072 62	0. 004 08	385	121	452	25	
1. 2	4. 74	31. 96	0. 15	0. 189 24	0. 026 75	2. 315 15	0. 302 41	0. 088 71	0. 005 31	2 736	215	548	31	
2. 1	20. 71	35. 79	0. 58	0. 060 09	0. 008 14	0. 888 51	0. 117 66	0. 107 24	0. 003 07	646	63	657	18	
2. 2	0. 28	15. 33	0. 02	0. 077 33	0. 018 16	0. 882 84	0. 201 08	0. 082 79	0. 005 19	643	108	513	31	
3. 1	2. 23	27. 39	0. 08	0. 070 61	0. 009 74	0. 791 66	0. 106 17	0. 081 31	0. 003 03	592	60	504	18	
3. 2	0. 49	9. 82	0. 05	0. 063 98	0. 022 34	0. 709 06	0. 242 37	0. 080 38	0. 005 76	544	144	498	34	
4. 1	29. 25	66. 11	0. 44	0. 077 71	0. 008 73	0. 997 14	0. 108 47	0. 093 06	0. 003 14	702	55	574	19	
5. 1	0. 46	8. 15	0. 06	0. 088 05	0. 018 3	1. 125 34	0. 226 22	0. 092 69	0. 005 45	766	108	571	32	
6. 1	0. 99	12. 41	0. 08	0. 085 07	0. 018 96	0. 971 99	0. 209 72	0. 082 87	0. 005 07	689	108	513	30	
7. 1	3. 26	24. 55	0. 13	0. 066 32	0. 010 17	0. 776 6	0. 115 26	0. 084 93	0. 003 28	584	66	525	19	
8. 1	0. 30	11. 62	0. 03	0. 472 88	0. 049 49	11. 014 76	0. 978 81	0. 168 94	0. 010 98	4 159	147	1 006	61	
9. 1	0. 46	10. 07	0. 05	0. 158 64	0. 029 35	1. 957 14	0. 339 58	0. 089 48	0. 006 3	2 441	283	553	37	
10. 1	1. 20	13. 58	0. 09	0. 048 02	0. 014 5	0. 490 16	0. 145 73	0. 074 03	0. 003 94	405	99	460	24	
11. 1	0. 42	10. 91	0. 04	0. 078 27	0. 017 94	0. 951 17	0. 212 2	0. 088 15	0. 005 11	679	110	545	30	
12. 1	0. 37	11. 61	0. 03	0. 058 82	0. 018 77	0. 640 42	0. 201 27	0. 078 97	0. 004 4	503	125	490	26	
13. 1	0. 19	9. 77	0. 02	0. 078 22	0. 020 48	0. 896 46	0. 227 79	0. 083 15	0. 005 72	650	122	515	34	
13. 2	1. 46	18. 14	0. 08	0. 072 25	0. 013 25	0. 823 38	0. 146 61	0. 082 67	0. 004 03	610	82	512	24	
14. 1	5. 68	22. 16	0. 26	0. 630 47	0. 025 01	24. 752 76	0. 845 97	0. 284 8	0. 008 44	4 580	56	1 616	42	
15. 1	0. 26	10. 09	0. 03	0. 072 63	0. 015 98	0. 850 19	0. 182 1	0. 084 92	0. 004 71	625	100	525	28	
15. 2	0. 68	14. 89	0. 05	0. 068 04	0. 011 86	0. 757 79	0. 128 8	0. 080 8	0. 003 55	573	74	501	21	
16. 1	1. 57	23. 86	0. 07	0. 065 87	0. 010 56	0. 693 25	0. 108 17	0. 076 37	0. 003 19	535	65	474	19	
17. 1	0. 46	13. 36	0. 03	0. 069 27	0. 012 56	0. 756 62	0. 133 59	0. 079 25	0. 003 65	572	77	492	22	
18. 1	0. 50	9. 68	0. 05	0. 055 29	0. 017 73	0. 608 25	0. 191 65	0. 079 79	0. 004 74	482	121	495	28	
19. 1	0. 19	9. 77	0. 02	0. 078 22	0. 020 48	0. 896 46	0. 227 79	0. 083 15	0. 005 72	1 152	447	515	34	
19. 2	1. 46	18. 14	0. 08	0. 072 25	0. 013 25	0. 823 38	0. 146 61	0. 082 67	0. 004 03	993	334	512	24	
20. 1	0. 52	6. 97	0. 07	0. 058 98	0. 022 56	0. 661 17	0. 249 11	0. 081 3	0. 005 32	515	152	504	32	
22. 1	4. 74	31. 96	0. 15	0. 057 77	0. 008 63	0. 631 09	0. 092 15	0. 079 26	0. 002 89	497	57	492	17	
23. 1	0. 68	14. 89	0. 05	0. 068 04	0. 011 86	0. 757 79	0. 128 8	0. 080 8	0. 003 55	870	325	501	21	
24. 1	1. 99	10. 42	0. 19	0. 648 56	0. 031 69	31. 075 58	1. 305 67	0. 347 65	0. 012 73	4 621	69	1 923	61	
25. 1	0. 46	13. 36	0. 03	0. 069 27	0. 012 56	0. 756 62	0. 133 59	0. 079 25	0. 003 65	907	335	492	22	
26. 1	0. 32	9. 13	0. 03	0. 653 54	0. 065 26	30. 096 34	2. 529 39	0. 334 18	0. 024 17	4 632	137	1 859	117	
26. 2	5. 81	30. 45	0. 19	0. 671 83	0. 052 13	29. 173 82	1. 898 97	0. 315 13	0. 017 9	4 672	107	1 766	88	
27. 1	0. 22	9. 9	0. 02	0. 641 37	0. 058 7	29. 244 04	2. 260 43	0. 330 9	0. 021 87	4 605	126	1 843	106	
28. 1	1. 24	18. 33	0. 07	0. 296 56	0. 030 26	4. 685 93	0. 426 57	0. 114 58	0. 006 02	3 452	150	699	35	
29. 1	1. 48	18. 16	0. 08	0. 568 42	0. 055 42	18. 479 16	1. 512 4	0. 235 94	0. 015 53	4 429	135	1 366	81	

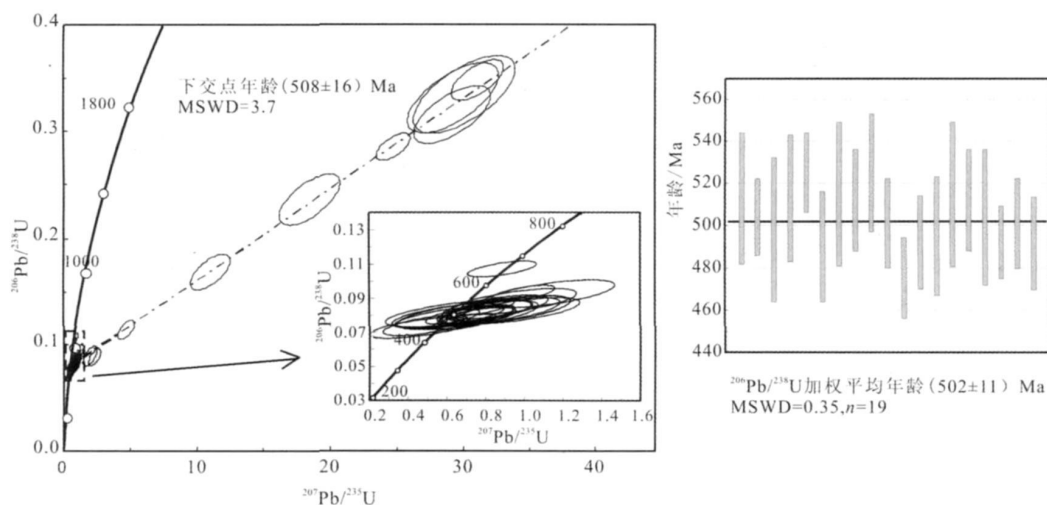


图3 秦岭官坡榴辉岩锆石的U-Pb年龄谐和图

Fig 3 Concordia diagram showing LA-ICP-MS U-Pb data for zircon grains from edogite in Guanpo Area, North Qinling

3.2 石榴石角闪岩

榴辉岩锆石主要呈浑圆长柱状形态, 柱面相对发育, 锥面较浑圆(图2b), 可见核-边或核-幔-边结构。其中核部反光较弱, 不同程度保留了岩浆的振荡环带或面状生长结构, 为原岩锆石的残留; 幔部围绕核部生长, 多呈带状结构; 锆石的边部反光较强, 多为均匀无结构, 少量呈斑杂状结构。

从表1和图2b可看出, 榴辉岩锆石不同部位测点的稀土元素组成无明显差别, 均呈轻稀土亏损、重稀土逐步富集的类似岩浆锆石的稀土配分型式。但仔细分析可看到, 核部测点的稀土总量和重稀土含量总体较高(核部测点的 ΣREE 和 ΣHREE 分别为 $(230.58 \sim 1051.83) \times 10^{-6}$ 和 $(227.08 \sim 1013.08) \times 10^{-6}$, 幔部和边部的分别为 $(22.55 \sim 499.33) \times 10^{-6}$ 和 $(22.06 \sim 495.95) \times 10^{-6}$, Eu负异常明显(核部和幔边部的 δEu 分别为 $0.11 \sim 0.47$, $0.27 \sim 0.75$ 和 $0.26 \sim 0.72$)。而且从表3可看出, 锆石核部测点有较高的Th、U含量(分别为 $(25.97 \sim 207.61) \times 10^{-6}$, $(55.40 \sim 594.26) \times 10^{-6}$)和Th/U比值(为 $0.11 \sim 0.93$, 多数大于0.4), 显示岩浆成因锆石特征。幔部和边部测点的Th含量明显降低, U含量较高, 但变化范围较大其中Th含量为 $(0.50 \sim 13.73) \times 10^{-6}$, U含量为 $(97.95 \sim 481.47) \times 10^{-6}$, 锆石Th/U比值为 $0.002 \sim 0.46$, 除个别点(5.1r, 17.1r, 19.1r分别为 0.13 , 0.22 , 0.46)外, 其余测点的Th/U比值均小于0.1, 表明锆石的幔部和边部形成于变质作用条件下。锆石的这种形貌和稀土配分曲线特征(图2b)与角闪岩相条件下变质锆石的特征一致^[34-35]。

榴辉岩锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄变化较大(表3), 所有测点在 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ - $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 谐和图上形成多个年龄集中区(图4)。其中, 来自锆石核部的7个测点在U-Pb一致曲线靠近上交点处形成一个年龄的聚集区, 对应 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (791 ± 6) Ma, 代表榴辉岩原岩的结晶年龄。锆石边部6个测点在U-Pb一致曲线靠近下交点处形成一个年龄的集中区, 其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄加权平均值为 (366 ± 4) Ma, 结合锆石的形貌和元素组成特征, 该年龄应代表晚期退变质事件的年龄。另外, 在核部和边部的两个年龄集中区之间, 有两个谐和年龄 (486 ± 9) Ma和 (505 ± 8) Ma, 这两个测点分别位于锆石的边部和幔部, 它们与榴辉岩的变质年龄 (502 ± 11) Ma在误差范围内一致。

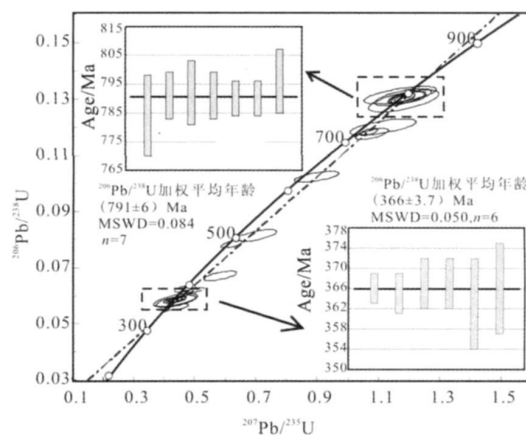


图4 石榴石角闪岩的U-Pb谐和图

Fig. 4 Concordia diagram showing LA-ICP-MS U-Pb data for zircon grains from garnet amphibolite

表3 石榴石角闪岩锆石的 LA-ICP-MS 分析结果

Table 3 LA-ICP-MS analytical data for zircon grains from garnet amphibolite in Guanpo Area, North Qinling

测点	$w_{\text{B}}/10^{-6}$			Th/U	同 位 素 比 值						年 龄 /Ma					
	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	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ
1. 1r	6.87	366.45	0.02	0.0579	0.0030	0.4460	0.0224	0.0559	0.0008	524	86	374	16	351	5	
2. 1m	2.63	571.19	0.01	0.0561	0.0017	0.4741	0.0138	0.0613	0.0005	457	69	394	10	383	3	
3. 1m	13.73	905.9	0.02	0.0544	0.0018	0.4388	0.0135	0.0585	0.0005	389	53	369	10	366	3	
3. 2c	207.61	444.78	0.47	0.0637	0.0035	0.8990	0.0478	0.1024	0.0013	730	119	651	26	629	7	
5. 1r	61.64	460.24	0.13	0.0591	0.0022	0.5053	0.0175	0.0620	0.0006	570	57	415	12	388	4	
6. 2c	138.6	148.31	0.94	0.0664	0.0044	1.1845	0.0768	0.1294	0.0025	820	103	793	36	784	14	
7. 1c	170.33	188.39	0.90	0.0632	0.0040	0.5842	0.0357	0.0671	0.0011	714	101	467	23	419	7	
9. 1m	4.14	481.47	0.01	0.0545	0.0021	0.4384	0.0162	0.0583	0.0006	393	64	369	11	365	4	
9. 2m	4.26	424.71	0.01	0.0543	0.0027	0.4682	0.0226	0.0625	0.0008	385	85	390	16	391	5	
11. 1c	49.18	132.09	0.37	0.0664	0.0024	1.1946	0.0412	0.1306	0.0015	818	53	798	19	791	8	
12. 1r	3.22	233.95	0.01	0.0541	0.0031	0.4362	0.0244	0.0585	0.0009	375	100	368	17	367	5	
12. 2c	47.82	55.4	0.86	0.0656	0.0035	1.1823	0.0615	0.1307	0.0020	795	83	792	29	792	11	
13. 1m	9.63	255.26	0.04	0.0545	0.0027	0.4403	0.0210	0.0587	0.0008	390	84	370	15	367	5	
13. 2c	43.66	290.89	0.15	0.0666	0.0022	1.1985	0.0366	0.1305	0.0014	826	46	800	17	791	8	
14. 1c	52.29	314.64	0.17	0.0656	0.0017	1.1797	0.0276	0.1305	0.0011	794	35	791	13	790	6	
16. 1r	0.71	137.58	0.01	0.0544	0.0060	0.4379	0.0474	0.0584	0.0015	388	195	369	33	366	9	
16. 2m	25.97	234.21	0.11	0.0627	0.0039	0.7047	0.0422	0.0816	0.0014	697	99	542	25	505	8	
17. 1r	78.07	357.58	0.22	0.0665	0.0023	1.0796	0.0355	0.1178	0.0013	821	50	743	17	718	7	
18. 2c	104.62	594.26	0.18	0.0661	0.0014	1.1881	0.0229	0.1305	0.0010	808	27	795	11	790	6	
18. 1r	9.98	238.96	0.04	0.0574	0.0023	0.6202	0.0234	0.0784	0.0008	507	88	490	15	486	5	
19. 1r	68.53	147.74	0.46	0.0550	0.0055	0.4397	0.0428	0.0580	0.0014	413	175	370	30	363	9	
20. 1c	53.45	112.24	0.48	0.0647	0.0045	1.1724	0.0790	0.1314	0.0020	764	150	788	37	796	11	
22. 1c	93.71	173.65	0.54	0.0673	0.0045	1.1161	0.0717	0.1203	0.0019	847	141	761	34	732	11	
23. 1c	125.71	493.44	0.26	0.0655	0.0013	1.0695	0.0185	0.1185	0.0009	789	24	738	9	722	5	

4 讨论与结论

4.1 榴辉岩和榴闪岩的原岩性质

已有地球化学研究表明,北秦岭官坡榴辉岩的原岩为海山玄武岩^[26],为讨论榴辉岩形成的构造背景以及榴辉岩与榴闪岩之间的关系,我们对本次定年的榴闪岩进行了元素地球化学分析(表4),并与已发表的榴辉岩的数据做了对比(榴辉岩为图5,6中阴影部分)。从表4中可看出,榴闪岩SiO₂质量分数稳定(49.16%~50.78%),属基性岩石,TiO₂质量分数较高(2.28%~2.83%),Al₂O₃质量分数为12.15%~13.21%,(Na₂O+K₂O)质量分数为2.22%~2.61%,且Na₂O>K₂O。岩石的Nb/Y=0.36~0.38,属于亚碱性岩浆系列,与榴辉岩的组成特征一致^[26]。

榴闪岩的稀土含量中等,ΣREE为(85.66~117.57)×10⁻⁶;在球粒陨石标准化稀土配分图解中(图5a),显示为LREE富集型,(La/Yb)_{CN}比值为2.60~3.04,基本不显Eu负异常(δEu=0.91~1.00)。在MORB标准化微量元素蛛网图(图5b)中,富集除Y和Yb以外的所有大离子亲石元素和高场强元素,不显示Nb、Ta的亏损,明显不同于MORB和VAB。岩石的Nb质量分数为(10.6~13.3)×10⁻⁶,Ta质量分数为(0.99~1.13)×10⁻⁶,Nb/Ta=10.14~11.96,落在上地壳岩石的10~12^[36-37];岩石的Ti/V比值为31.48~43.81,落在大陆溢流玄武岩范围(图6a)。在多种玄武岩的构造环境判别图解(图6b-d)中,北秦岭榴辉岩和榴闪岩样品的投影点皆落在板内玄武岩或大陆玄武岩区域,指示榴辉岩(榴闪岩)的原岩不是形成在典型大洋环境,推测可能与秦岭新元古代(710~810Ma)之后的裂解事件有关^[38]。

表 4 北秦岭榴闪岩的主、微量元素分析结果

Table 4 Major and trace element compositions of the garnet amphibolite in Guanpo Area, North Qinling

样品号	$w_B/\%$												Total
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI		
05QL-22a	49.16	2.83	12.15	16.98	0.21	6.60	9.76	1.83	0.39	0.19	0.21	100.31	
05QL-22b	50.13	2.70	12.31	16.35	0.21	6.37	9.82	1.98	0.37	0.22	-0.09	100.37	
05QL-22c	50.00	2.53	12.69	15.30	0.20	6.79	10.27	2.01	0.29	0.18	0.20	100.46	
05QL-22d	50.78	2.28	13.21	14.53	0.20	6.25	9.98	2.15	0.46	0.23	0.20	100.27	
05QL-22e	50.08	2.51	13.01	15.05	0.20	6.71	10.12	2.04	0.32	0.17	0.24	100.45	
05QL-22f	50.62	2.45	12.94	14.79	0.20	6.52	10.02	2.04	0.40	0.22	0.08	100.28	
05QL-22g	49.38	2.63	12.43	15.57	0.20	7.05	10.16	2.13	0.28	0.16	0.26	100.25	
05QL-22h	50.59	2.43	12.66	14.89	0.20	6.57	9.95	1.91	0.40	0.22	0.20	100.02	

样品号	$w_B/10^{-6}$														Ta			
	Ba	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Th	Pb	Ga	Zn	Cu	Ni	V	Cr		Hf	Cs	Sc
05QL-22a	57.8	8.52	201	33.4	160	11.7	1.44	3.83	25.2	141	107	96	539	145.3	4.22	0.284	37.8	0.99
05QL-22b	61.1	8.38	223	35.9	173	12.8	1.58	3.69	24.5	137	127	88	449	113.0	4.77	0.352	36.8	1.07
05QL-22c	51.7	6.42	170	30.0	142	10.9	1.25	1.40	23.4	125	112	97	461	126.1	3.94	0.304	36.6	1.00
05QL-22d	122.0	14.36	315	37.0	182	13.1	1.62	4.83	24.6	120	175	82	312	127.3	4.94	0.639	34.3	1.11
05QL-22e	43.93	7.22	192	29.3	144	10.7	1.24	1.83	23.1	126	77	97	455	135.4	4.04	0.142	36.1	1.01
05QL-22f	53.9	9.37	285	35.0	172	13.0	1.54	5.02	24.4	130	137	95	366	145.5	4.66	0.175	36.9	1.09
05QL-22g	30.97	5.64	95	29.3	140	10.6	1.15	0.94	21.8	128	74	120	452	189.0	3.92	0.118	36.9	1.04
05QL-22h	53.4	8.17	233	34.9	170	13.3	1.53	4.49	22.8	129	156	88	341	137.2	4.80	0.189	35.8	1.13

样品号	$w_B/10^{-6}$														Lu			
	Co	Li	Be	U	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho		Er	Tm	Yb
05QL-22a	165	12.02	0.74	0.42	11.53	28.9	4.36	20.2	5.69	1.89	6.22	0.98	6.11	1.26	3.08	0.44	2.85	0.40
05QL-22b	152	12.53	0.87	0.49	13.75	34.7	5.26	24.7	6.83	2.25	7.33	1.15	7.06	1.42	3.57	0.50	3.16	0.45
05QL-22c	182	13.89	0.74	0.384	11.58	28.9	4.46	20.9	5.88	1.97	6.23	0.98	6.03	1.23	3.03	0.43	2.69	0.38
05QL-22d	170	12.05	0.91	0.51	14.65	36.4	5.55	25.9	7.16	2.37	7.72	1.21	7.32	1.46	3.65	0.52	3.24	0.45
05QL-22e	199	12.56	0.73	0.373	11.12	27.5	4.25	19.8	5.57	1.90	6.04	0.97	5.94	1.20	2.99	0.43	2.66	0.38
05QL-22f	173	12.16	0.94	0.45	13.66	34.3	5.23	24.5	6.70	2.21	7.20	1.13	6.85	1.40	3.47	0.49	3.08	0.44
05QL-22g	207	13.85	0.78	0.273	10.46	25.7	3.97	18.5	5.18	1.63	5.57	0.92	5.84	1.22	3.08	0.44	2.71	0.40
05QL-22h	180	12.81	0.88	0.42	13.91	35.1	5.35	24.8	6.87	2.12	7.26	1.17	7.11	1.45	3.64	0.52	3.22	0.46

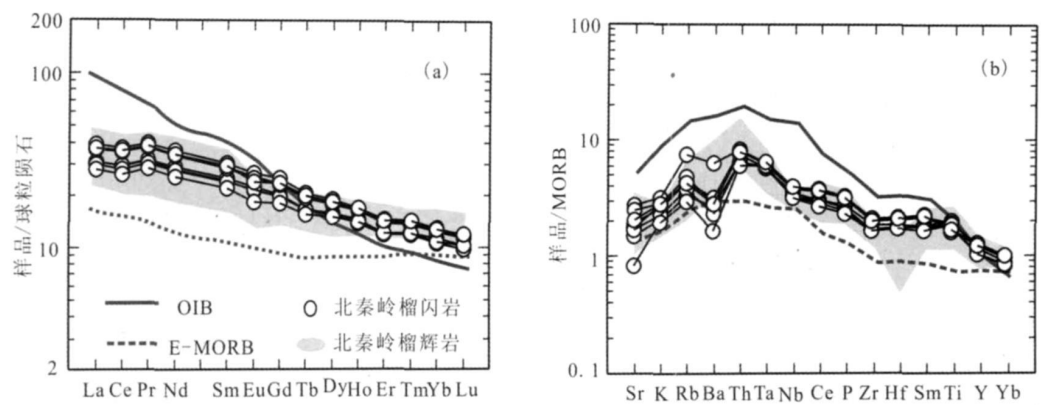


图5 榴闪岩球粒陨石标准化稀土配分图解(a)和多元素 MORB 标准化蛛网图(b)
Fig. 5 Chondrite-normalized REE patterns (a) and MORB normalized elements spider diagram of garnet amphibolite

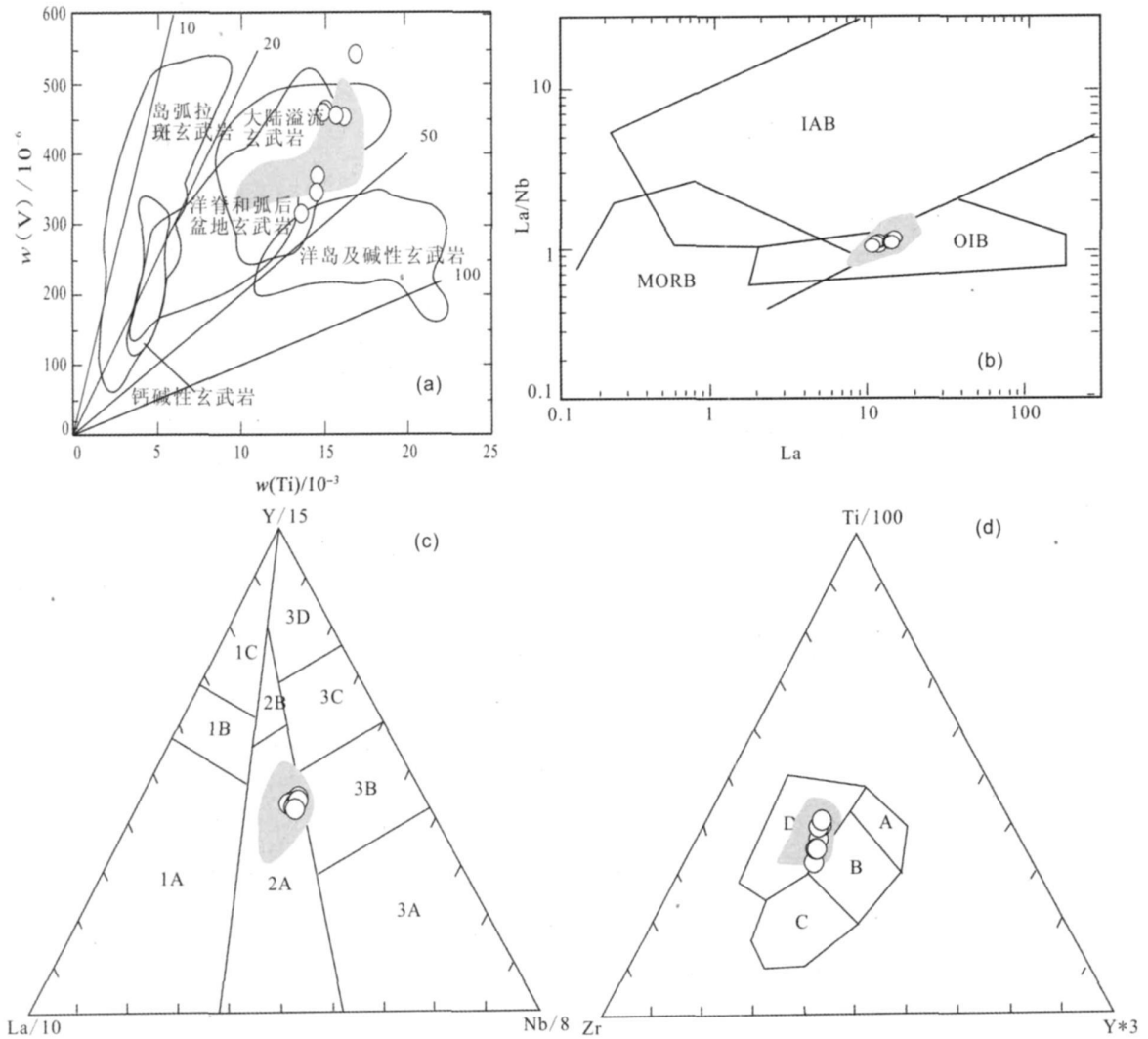


图6 玄武岩构造环境判别图
Fig. 6 Trace element tectonic setting diagrams of basalt
(图中阴影部分为北秦岭榴辉岩^[26])

(a) Ti-V 图解; (b) La/Nb-La 图解; (c) Y-La-Nb 图解; 1—火山弧玄武岩; 2—大陆玄武岩; 3—大洋玄武岩; 1A—钙碱性玄武岩; 1C—火山弧拉斑玄武岩; 1B—为 1A 和 1C 的重叠区域; 2A—大陆玄武岩; 2B—弧后盆地玄武岩; 3A—大陆裂谷碱性玄武岩; 3B 及 3C 为 E-MORB (3B 富集, 3C 弱富集); 3D—N-MORB; (d) Ti-Zr-Y 图解; A—岛弧拉斑玄武岩; B—MORB、岛弧拉斑玄武岩、钙碱性玄武岩; C—钙碱性玄武岩; D—板内玄武岩。

4.2 榴辉岩及其原岩的形成年龄

秦岭官坡榴辉岩锆石具有浑圆的外观、均匀无结构或显示核边内部结构。具有均匀内部结构锆石和具有核边结构锆石的边部区域同时显示了较为平坦的 HREE 配分曲线型式(图 2a)无明显 Eu 负异常和较低的 Th/U 比值(0.02~0.15, 平均 0.07), 均符合榴辉岩相变质锆石的特征^[34-35, 39-41], 因此, 由这些锆石或测点所得到的(502±11) Ma 的加权平均年龄应代表北秦岭官坡榴辉岩的形成年龄。该年龄与杨经绥 2002 年对榴辉岩的定年结果(493±170) Ma 基本一致, 但本次获得的年龄精度较好。

本次研究的榴闪岩与榴辉岩产于同一露头, 两者之间无明显界限, 手标本上也无明显差别。前人对本区野外填图和岩相学观察指出, 北秦岭官坡地区的榴辉岩与榴闪岩、斜长角闪岩在露头上连续产出, 矿物结构与组构为渐变过渡关系, 榴闪岩和斜长角闪岩为榴辉岩不同程度退变质的产物^[30]。结合上节讨论中两者地球化学特征的一致性, 进一步证明本文研究的榴闪岩是榴辉岩的角闪岩相退变质的产物。而且, 榴闪岩中锆石较为自形的长柱状形态以及明显富集重稀土的 REE 配分型式和较高的 Th/U 比值(图 2b, 表 2)也与角闪岩相条件下变质锆石的特征吻合^[34-35]。非常幸运的是, 本次研究在榴闪岩锆石的核部得到(791±6) Ma 代表的岩浆事件年龄, 考虑到它与榴辉岩的继承性, 该年龄也应该是榴辉岩原岩的结晶年龄。但遗憾的是, 强烈的角闪岩相改造, 榴辉岩相变质的年龄仅在个别锆石的幔部稍有残留(487~503 Ma), 多数锆石记录了(366±4) Ma 的角闪岩相退变质年龄。

综合榴辉岩和榴闪岩的定年结果, 我们认为, 北秦岭官坡超高压榴辉岩的变质年龄为(502±11) Ma, 原岩结晶年龄为(791±6) Ma, 角闪岩相退变质年龄为(366±4) Ma。

4.3 北秦岭超高压变质地体的属性

高压超高压变质带是古板块汇聚边界及大陆碰撞造山的重要标志, 它记录了地壳物质从俯冲到构造折返的一个完整的动力学过程。根据原岩建造、变质作用和岩石组合等方面的差异, 目前大陆上的古俯冲带可划分为大洋俯冲型和大陆俯冲型两种类型^[42-45]。其中大洋俯冲型超高压变质带中超高压变质岩石的原岩为典型洋壳岩石、变质温度较低(<600 °C)且与蛇绿岩和岛弧火山岩密切伴生^[45]; 而大陆型古俯冲带超高压变质岩的原岩为表壳沉积岩、花岗岩质岩石和侵位其中的陆相火山岩、超基性岩, 基本不与蛇绿岩共生, 变质温度一般较高(>600 °C)。目前在全球范围内发现的 25 个超高压变质带中, 除我国的西天山^[46]和西 Alps 的 Zermatt-Saas 带^[47-48]外, 其余都属于大陆俯冲型超高压带。

横贯中国的中央造山带东部的大别—苏鲁造山带为典型的大陆俯冲型超高压变质带^[3], 西部的柴北缘和阿尔金造山带主体也为大陆俯冲型^[5, 14-15, 49], 但柴北缘也存在少量洋壳深俯冲的物质记录^[7]。那么, 北秦岭超高压地体的性质又如何呢? 依据在柴北缘超高压变质带的研究经验^[13-14], 结合北秦岭榴辉岩的产状、地球化学特征和年代学研究结果, 我们认为北秦岭榴辉岩也是大陆深俯冲作用的产物, 证据有: (1) 榴辉岩呈透镜体状包裹于围岩长英质片麻岩中, 榴辉岩与围岩长英质片麻岩以及松树沟地区超高压长英质变质岩共同经历了超高压变质作用且具有大致相同的变质年龄(榴辉岩为(502±11) Ma, 围岩片麻岩为(507±38) Ma^[1], 松树沟 UHP 长英质片麻岩为 485~814 Ma); (2) 榴辉岩的原岩显示了板内玄武岩的特征, 虽然不能明确说明它是否为陆相火山岩, 但它显然与蛇绿岩无关, 也不显示陆缘火山岩的特点, 尤其是本次研究获得榴辉岩的原岩结晶年龄为(791±6) Ma, 而榴辉岩相变质年龄为(502±11) Ma, 两者之间存在近 300 Ma 的时间间隔, 根据在超高压地体的研究经验和所取得的共识, 无论榴辉岩的原岩是否是大洋玄武岩, 从年代学上也不支持北秦岭是洋壳深俯冲的结论。

参考文献

- [1] 杨经绥, 许志琴, 裴先治, 等. 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[J]. 地质学报, 2002, 76(4): 484-495.
- [2] Liu L, Chen D L, Sun Y, et al. Discovery of relic majoritic garnet in felsic metamorphic rocks of Qinling complex, north Qinling orogenic belt, China [C] // Alice Wain Memorial Western Norway Eclogite Field Symposium. Selje, Western Norway, Abstract, 2003, 1: 82.
- [3] Liu F L, Xu Z Q, Liou J G, et al. SHRIMP U-Pb ages of ultrahigh-pressure and retrograde metamorphism of gneisses, southwestern Sulu terrane, eastern China [J]. Journal of Metamorphic Geology, 2004, 22: 316-326.

- [4] 杨经绥, 宋述光, 许志琴, 等. 柴达木盆地北缘早古生代高压-超高压变质带发现典型超高压矿物: 柯石英[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 175-179.
- [5] 杨经绥, 张建新, 孟繁聪, 等. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质岩及其原岩性质探讨[J]. 地学前缘, 2003, 10(3): 291-313.
- [6] Song S G, Zhang L F, Niu Y L, et al. Evolution from oceanic subduction to continental collision: A case study of the northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data[J]. Journal of Petrology, 2006, 47: 435-455.
- [7] Zhang G B, Song S G, Zhang L F, et al. The subducted oceanic crust within continental type UHP metamorphic belt in the North Qaidam, NW China: Evidence from petrology, geochemistry and geochronology [J]. Lithos, 2008, 104: 99-118.
- [8] 张建新, 孟繁聪, 李金平, 等. 柴达木北缘榴辉岩中的柯石英及其意义[J]. 科学通报, 2009, 54(5): 618-623.
- [9] 刘良, 孙勇, 肖培喜, 等. 阿尔金发现超高压(> 3.8 GPa)石榴石二辉橄榄岩[J]. 科学通报, 2002, 47(9): 657-662.
- [10] 刘良, 张安达, 陈丹玲, 等. 阿尔金江孜勒萨依榴辉岩和围岩锆石 LA-ICP-MS 微区原位定年及其地质意义[J]. 地学前缘, 2007, 14(1): 98-107.
- [11] Liu L, Wang C, Chen D L, et al. Petrology and geochronology of HP-UHP rocks from the South Altyn Tagh, northwestern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3/4): 232-244.
- [12] Mattinson C G, Wooden J L, Liou J G, et al. Age and duration of eclogite-facies metamorphism, North Qaidam HP/UHP terrane, Western China[J]. American Journal of Science, 2006, 306: 683-711.
- [13] 陈丹玲, 孙勇, 刘良, 等. 柴北缘鱼卡河超高压榴辉岩的变质年龄[J]. 中国科学, 2007, 37(增刊): 279-287.
- [14] Chen D L, Liu L, Sun Y, et al. Geochemistry and zircon U-Pb dating and its implications of the Yukahe HP/UHP terrane, the North Qaidam, NW China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2009, 35(3/4): 259-272.
- [15] 陈丹玲, 孙勇, 刘良. 柴北缘野马滩超高压榴辉岩中副片麻岩夹层的锆石 U-Pb 定年及其地质意义[J]. 岩石学报, 2008, 24(6): 1059-1067.
- [16] 张安达, 刘良, 陈丹玲, 等. 阿尔金超高压花岗质片麻岩中锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其地质意义[J]. 科学通报, 2004, 49(22): 2335-2341.
- [17] 刘良, 周鼎武. 东秦岭商南松树沟高压基性麻粒岩的发现及初步研究[J]. 科学通报, 1994, 39(17): 1599-1601.
- [18] 陈丹玲, 刘良, 孙勇, 等. 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[J]. 科学通报, 2004, 49(18): 1901-1908.
- [19] 刘军峰, 孙勇. 东秦岭松树沟超基性岩体“热”侵位时代新知[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 189-192.
- [20] 苏犁, 宋述光, 宋彪, 等. 松树沟地区石榴辉石岩和富水杂岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄及其对秦岭造山带构造演化的制约[J]. 科学通报, 2004, 49(12): 1209-1211.
- [21] Liu L, Yang J X, Chen D L, et al. Progress and controversy in the study of HP-UHP metamorphic terranes in the west and middle central China orogen [J]. Journal of Earth Science, 2010, 21(5): 581-597.
- [22] 胡能高, 王涛, 杨家喜, 等. 东秦岭秦岭岩群中榴辉岩的发现及其地质意义[J]. 西安地质学院学报, 1994, 16(2): 105-106.
- [23] 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 北秦岭含柯石英榴辉岩的发现及其意义[J]. 科学通报, 1994, 39(21): 2013.
- [24] 胡能高, 杨家喜, 赵东林. 北秦岭榴辉岩 Sm-Nd 同位素年龄[J]. 矿物学报, 1996, 16(4): 349-352.
- [25] 王焰, 刘良, 周鼎武. 东秦岭松树沟长英质高压麻粒岩的原岩性质[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 1997, 27(06): 196-206.
- [26] 张安达, 刘良, 王焰, 等. 北秦岭榴辉岩地球化学特征及形成环境[J]. 西北大学学报: 自然科学版, 2003, 33(2): 191-195.
- [27] 张国伟, 张本仁, 袁学诚, 等. 秦岭造山带与大陆动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 421-458.
- [28] 陆松年, 李怀昆, 陈志宏, 等. 秦岭中—新元古代地质演化及对 Rodinia 超级大陆事件的响应[M]. 北京: 地质出版社, 2003: 1-194.
- [29] 赵蛟, 陈丹玲, 谭清海, 等. 北秦岭东段二郎坪群火山岩的地球化学与年代学研究[C] // 全国岩石学与地球动力学研讨会摘要集. 北京, 2010: 129-130.
- [30] 胡能高, 赵东林, 徐柏青, 等. 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[J]. 矿物岩石, 1995, 15(4): 1-9.
- [31] Andersen T. Correction of common lead in U-Pb analyses that do not report ^{204}Pb [J]. Chemical Geology, 2002, 192: 59-79.
- [32] 袁洪林, 吴福元, 高山, 等. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析[J]. 科学通报, 2003, 48: 1511-1520.
- [33] Gao S, Ling W L, Qiu Y M, et al. Contrasting geochemical and Sm-Nd isotopic compositions of Archean metasediments from the Kongling high-grade terrain of the Yangtze craton: Evidence for cratonic evolution and redistribution of REE during crustal anatexis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63: 2071-2088.
- [34] Hemann J, Rubatto D, Korsakov A, et al. Multiple zircon growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav Massif, Kazakhstan)[J]. Con-

- tributions to Mineralogy and Petrology, 2001, 141: 66-82.
- [35] Vavra G, Schmid R, Gebauer D. Internal morphology, habit and U-Th-Pb microanalysis of amphibolite to granulite facies zircons: Geochronology of the Ivrea Zone (Southern Alps) [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1999, 134: 380-404.
- [36] Rudnick R L, Gao S. Composition of the continental crust [M] // Rudnick R L. The Crust, 1-64, Treaties on Geochemistry. Oxford: Elsevier Pergamon, 1995.
- [37] Taylor S R, McLennan S M. The Continental Crust: Its Composition and Evolution [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1985: 312.
- [38] 陆松年, 陈志宏, 李怀坤, 等. 秦岭造山带中两条新元古代岩浆岩带 [J]. 地质学报, 2005, 79(2): 165-173.
- [39] Rubatto D, Gebauer D, Compagnoni R. Dating of eclogite facies zircons: The age of Alpine metamorphism in the Sesia-Lanzo Zone (Western Alps) [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1999, 167: 141-158.
- [40] Rubatto D. Zircon trace element geochemistry: Partitioning with garnet and the link between U-Pb ages and metamorphism [J]. Chemical Geology, 2002, 184: 123-138.
- [41] Whitehouse M J, Platt J P. Dating high-grade metamorphism: Constraints from rare-earth elements in zircon and garnet [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 2003, 145: 61-74.
- [42] Maruyama S, Liou J G, Terabayashi M. Blueschists eclogites of the world and their exhumation [J]. International Geology Review, 1996, 38: 485-594.
- [43] Ernst W G. Subduction, ultrahigh-pressure metamorphism and regurgitation of buoyant crustal slices: Implications for arcs and continental growth [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2001, 127: 253-275.
- [44] Liou J G, Tsujimori T, Zhang R Y, et al. Global UHP metamorphism and continental subduction/collision: The Himalaya model [J]. International Geology Review, 2004, 46: 1-27.
- [45] 张立飞, 吕增, 张贵宾, 等. 大洋型超高压变质带的地质特征及其研究意义: 以西南天山、柴北缘超高压变质带为例 [J]. 科学通报, 2008, 53(18): 2166-2175.
- [46] Zhang L F, David J, Ellis S, et al. Ultrahigh pressure metamorphism in eclogites from the Western Tianshan, China [J]. American Mineralogist, 2003, 88: 1157-1160.
- [47] Tagiri M, Yano T, Bakirov A, et al. Mineral parageneses and metamorphic p - T paths of ultrahigh-pressure eclogites from Kyrgyzstan Tianshan [J]. The Island Arc, 1995, 4: 280-292.
- [48] Reinecke T. Prograde high to ultrahigh-pressure metamorphism and exhumation of oceanic sediments at Lago di Cignana, Zermatt-Saas Zone, western Alps [J]. Lithos, 1998, 42: 147-189.
- [49] Zhang J X, Yang J S, Mattinson C G, et al. Two contrasting eclogite cooling histories, North Qaidam HP/UHP terrane, western China: Petrological and isotopic constraints [J]. Lithos, 2005, 84: 51-76.