

doi:10.12097/j.issn.1671-2552.2022.12.013

扬子北缘南华系武当群锆石 U-Pb 年龄:对扬子北缘南华纪裂解模式的启示

孔令耀^{1,2}, 杨成¹, 李琳静¹, 周峰^{1,2}, 郭盼^{1,2}, 陈超^{1,2}

KONG Lingyao^{1,2}, YANG Cheng¹, LI Linjing¹, ZHOU Feng^{1,2}, GUO Pan^{1,2}, CHEN Chao^{1,2}

1.湖北省地质调查院,湖北 武汉 430034;

2.湖北省地质勘查工程技术研究中心,湖北 武汉 430034

1.Hubei Geological Survey, Wuhan 430034, Hubei, China;

2.Hubei Research Center of Geological Exploration and Engineering Technology, Wuhan 430034, Hubei, China

摘要:扬子北缘出露的武当群是南秦岭地区最重要的基底组成物质,记录了南秦岭最古老的物质信息。为探讨扬子北缘南华纪的地层序列与裂谷演化模式,对湖北随州地区武当群典型剖面上的碎屑岩和火山岩进行锆石 U-Pb 测年,确定了武当群的沉积层序,并结合武当、随州地区的武当群锆石年龄,认为武当地区武当群年龄较随州地区老 30 Ma 左右,显示扬子北缘的南华纪裂谷具有自西向东逐渐打开的“剪刀式”裂解特征。武当群碎屑锆石主要峰值年龄为 722 Ma、759 Ma、820 Ma、2014 Ma 和 2445 Ma,与扬子陆块碎屑锆石的峰值具有较好的对应,指示了武当群与扬子陆块强烈的亲缘性,峰值 2014 Ma 则反映武当群可能有来自桐柏—大别地区的物源信息;722~759 Ma 的峰值代表扬子北缘南华纪早期裂解最强烈的时期,该裂解事件可能是扬子北缘 Rodinia 超大陆裂解过程的体现。

关键词:扬子北缘;武当群;锆石年龄;“剪刀式”裂解;地质调查工程;湖北

中图分类号:P597+.3;P62 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-2552(2022)12-2224-20

Kong L Y, Yang C, Li L J, Zhou F, Guo P, Chen C. Zircon U-Pb age of Wudang Group: implication to the breakup model of North Yangtze Block during the Early Neoproterozoic. *Geological Bulletin of China*, 2022, 41(12): 2224-2243

Abstract: The Wudang Group exposed in the northern margin of Yangtze Block is one of the most important basement of South Qinling Orogen, and it records the oldest provenance information of South Qinling Orogen. In order to explore the stratigraphic sequence of Wudang Group and rift evolution model of Nanhua period in the northern margin of Yangtze Block, we dated the zircon U-Pb age of clastic and volcanics from typical geological sections of Wudang Group in Suizhou area, and determined the sedimentary sequence of Wudang Group. Combined with the chronological information of Wudang Group in Suizhou and Wudang area from previous researches, we find that the stratigraphic age of Wudang Group in Wudang area is older about 30 Ma than the ages in Suizhou area, which shows that the rift during Neoproterozoic may be cracking gradually like a "scissor" from west to east in the northern margin of Yangtze Block. The main age peaks of detrital zircons from Wudang Group is about 722 Ma, 759 Ma, 820 Ma, 2014 Ma and 2445 Ma, which has a good correlation with main age peaks of detrital zircons from Yangtze Block, suggesting that the main provenance of Wudang Group is coming from the Yangtze Block. The age peak of 2014 Ma shows there may be provenance information from Tongbai-Dabie area, and the age peak about 722~759 Ma represents the strongest period of breaking up in the northern margin of Yangtze Block, which may be the embodiment of the Rodinia supercontinent break-up in the northern margin of Yangtze Block.

Key words: the northern margin of Yangtze Block; Wudang Group; zircon U-Pb age; "scissor-like" cracking; geological survey engineering; Hubei Province

收稿日期:2020-07-19; **修订日期:**2021-05-20

资助项目:中国地质调查局项目《湖北省 1:5 万长岗店幅(编号:H49E003020)、均川幅(H49E003021)、客店坡幅(H49E004020)、古城畈幅(H49E004021)、三阳店幅(H49E005021)区域地质调查》(编号:DD20160030)和湖北省地质局项目《武当-桐柏-大别造山带重要地质过程及其资源效应研究》(编号:KJ2022-6)

作者简介:孔令耀(1989-),男,硕士,工程师,从事区域地质调查工作。E-mail:951121661@qq.com

扬子陆块北缘南秦岭造山带是秦岭-桐柏-大别-苏鲁造山带的重要组成部分,研究南秦岭造山带主要构造单元的性质,尤其是前寒武纪的地质演化,对于认识南秦岭和扬子陆块基底演化具有重要的意义。湖北省武当-随州一带出露的南华系武当群是南秦岭地区最重要的基底物质,记录了南秦岭古老的物质信息,成为研究扬子陆块前寒武纪演化的重要对象^[1]。近年来,对武当群的研究成果不断涌现,为探讨南秦岭前寒武纪基底演化提供了大量资料(图 1)。

前人以南襄盆地为界,将湖北武当-随州一带出露的早南华世地层划分为武当群、大狼山群和随县群,随着研究的深入,认为这些地层单位在岩性组成、形成时代和环境上较相似,将之统一划归为武当群,并根据岩性组合划分为杨坪组(变沉积岩组)和双台组(变火山岩组)^[11-13]。但是对武当群的层序存在 2 种相反的观点:一种观点认为,变火山岩组在下部,变沉积岩组在上部^[4, 12, 14-15];另一种则认为,变沉积岩组在下部,变火山岩组在上部^{②③[3, 13]}。由于武当群经历了多期强烈的构造作用,地层层序改造、破坏严重(图 2),仅依靠野外调查难以确定其层序特征,需要借助系统的年代学资料对比研究;

薛怀民等^[6-7]对武当群的研究认为,武当地区和随州地区出露的武当群具有可对比性,也存在明显的差异,但未开展详细的对比分析。本文在随州南部区域地质调查的基础上,针对该区域武当群典型剖面开展了详细的锆石 U-Pb 测年,并结合前人在武当-随州一带报道的成果资料,探讨随州、武当地区的武当群层序和扬子北缘南华纪早期地质演化规律。

1 地质背景

南秦岭造山带位于秦岭-桐柏-大别-苏鲁造山带中段,南部以襄广断裂与扬子陆块相望,北部以商丹断裂与北秦岭相接,向北东至新城-黄陂断裂、东至团麻断裂为界与大别高压-超高压变质带分隔。南秦岭造山带南华系经历了多期次的构造改造和低角闪岩相-绿片岩相变质作用,使原始地层层序破坏严重^[16]。

本文在 1:5 万区域地质调查基础上,总结前人认识,根据出露的岩性组合特征,将武当群划分为杨坪组和双台组。杨坪组主要为一套浅变质的石英砂岩、长石石英砂岩、长石砂岩、粉砂岩,含少量碳酸盐岩夹层或透镜体,局部含炭质、硅质条带或磷结核;双台组以酸性火山(凝灰)岩为主体,可见

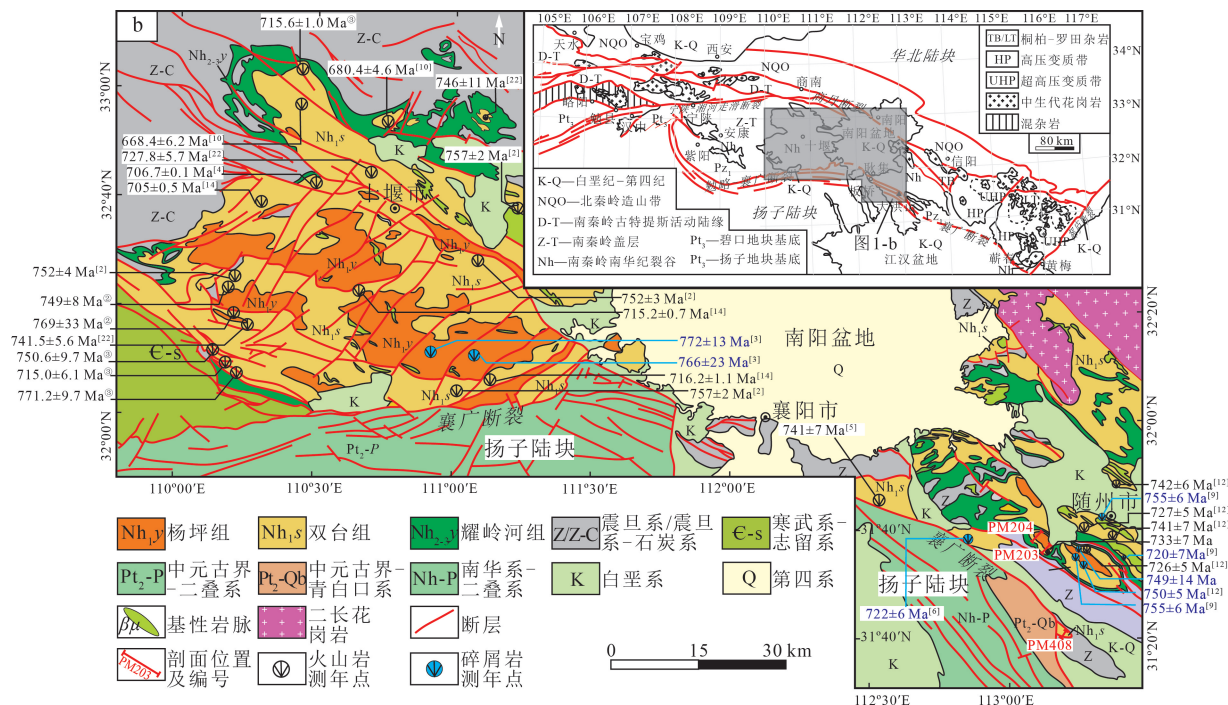


图 1 南秦岭武当-随州地区区域地质简图

Fig. 1 Simplified geological map of South Qinling Orogen in Wudang-Suizhou area

双峰式火山岩组合,局部发育酸性火山岩夹中—细粒碎屑岩、泥粉砂岩和碳酸盐岩透镜体组合^[11-13]。

2 样品采集与岩相学特征

本文以随州南部均川—三阳一带出露的武当群为研究对象,在武当群出露完整的地区测制剖面(剖面 PM203、PM204 和 PM408)(图 1、图 2),在系统查明该地区武当群物质组成和变质变形特征的基础上,对剖面上的变质砂岩和变质火山岩分别采集了同位素年龄样品。其中,样品 PM203-12-1、PM204-7-1 和 PM408-21-1 为变质砂岩,样品 PM203-17-1 为变质酸性含晶屑凝灰岩。

样品 PM203-12-1 采自均川镇西南雷火冲(东经 113°8′37″、北纬 31°36′52″),岩性为变质粗—中粒长石石英砂岩,野外露头呈浅灰白色,变余粗—中粒砂状结构,块状构造,镜下显示主要由砂质碎屑组成,包括石英(约 72%)、长石(斜长石、钾长石均见,约 15%),还可见少量其他岩屑(约 5%)和杂基(约 7%),杂基成分为显微鳞片状的绢云母,少量铁质矿物和锆石(约 1%)。砂质碎屑物分选性和磨圆度均属中等程度,粒度以中砂级为主,次为粗砂级,外形多呈次棱角或次圆状,极少数呈圆状,是经过一定距离搬运再沉积的产物(图版 I-a、b)。

样品 PM203-17-1 采自均川镇南侧陶家垭子(东经 113°8′18″、北纬 31°36′44″),岩性为变质酸性含晶屑凝灰岩,浅灰白色,变余含晶屑凝灰结构,块状构造,岩石主要由钾长石(约 40%)、斜长石(约 10%)、石英(约 26%)和绢云母(约 20%)组成,含少量黑云母(约 2%)和褐铁矿(约 2%)。钾长石类型为具条纹双晶的条纹长石和正长石,斜长石以钠长石为主,具残余晶屑特征,粒度 0.1~0.25 mm,石英呈他形齿状分布于长石之间。在成岩过程中,受区域变质影响,岩石中的凝灰质经变质形成显微他形齿状的长英矿物集合体(图版 I-c、d)。

样品 PM204-7-1 采自随县罗河水库西侧上观山(东经 113°5′44″、北纬 31°39′13″),岩性为变质中粒长石石英砂岩,露头上呈浅灰白色,变余中粒砂状结构,块状构造,主要由砂质碎屑物组成,包括石英(约 87%)、长石(钾长石和斜长石,约 7%),以及少量其他岩屑(主要为酸性火山岩成分,约 2%)和褐铁矿(约 1%),杂基成分为显微鳞片状的绢云母和绿泥石(约 3%)。砂质碎屑物分选性较好,粒度以中砂级为主,夹杂约 5%的粗砂级,粒度 0.5~0.85 mm,磨圆度中等,多呈次棱角或次圆状,少数呈压扁状,是经过一定距离搬运再沉积的产物(图版 I-e、f)。

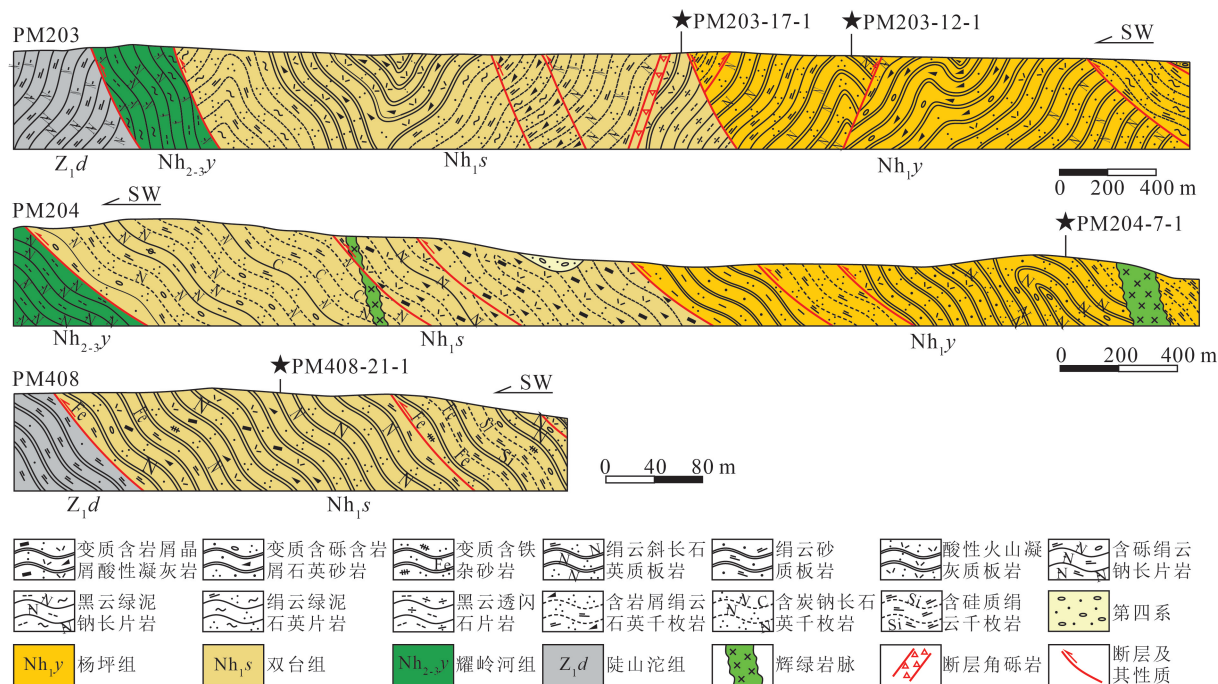
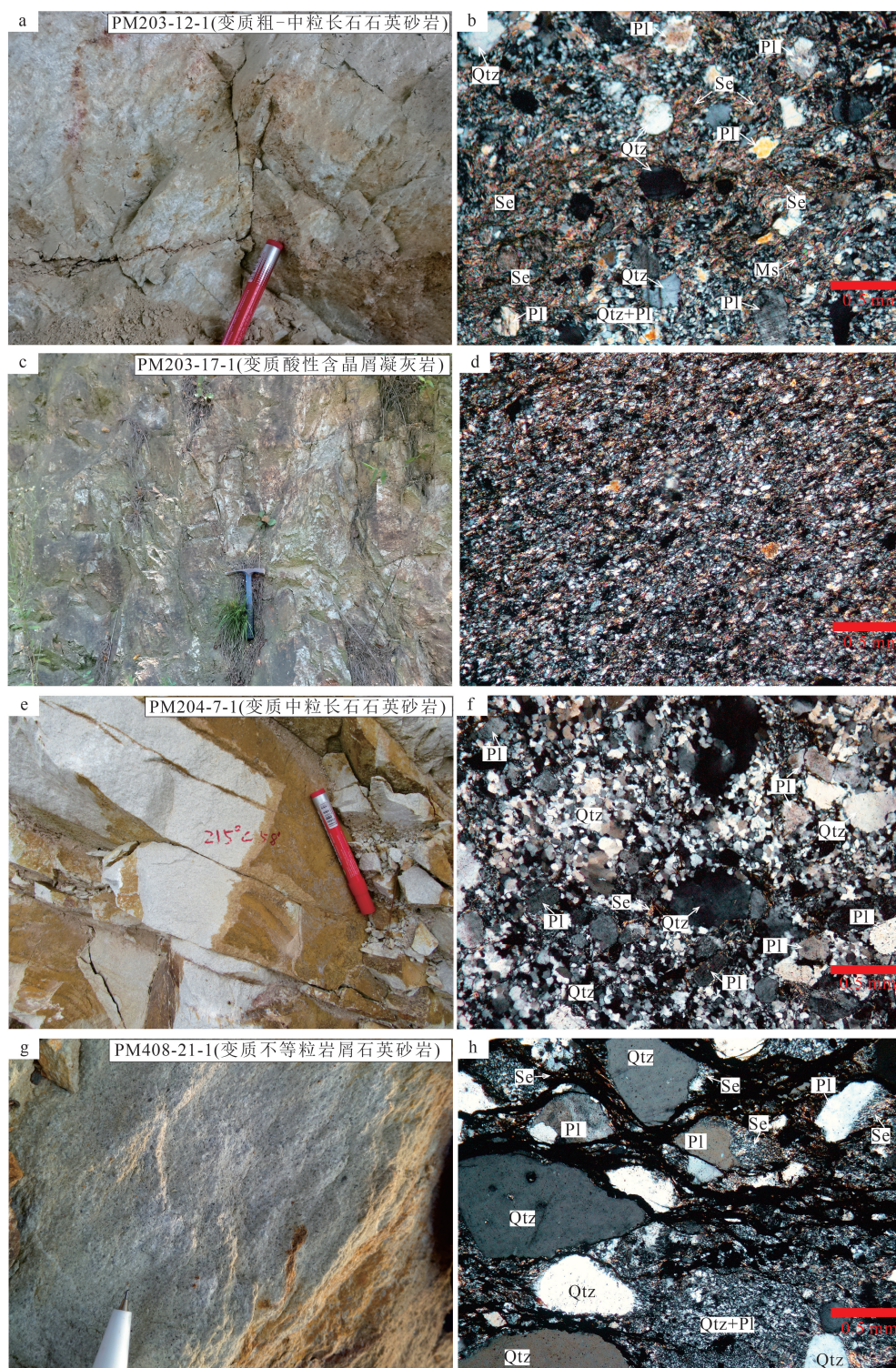


图 2 随州南部典型武当群实测地质剖面

Fig. 2 The typical measured geological sections of Wudang Group in south Suizhou

图版 I Plate I



a, b. PM203-12-1 变质粗—中粒长石石英砂岩野外与镜下特征; c, d. PM203-17-1 变质酸性含晶屑凝灰岩野外与镜下特征; e, f. PM204-7-1 变质中粒长石石英砂岩野外与镜下特征; g, h. PM408-21-1 变质不等粒岩屑石英砂岩野外与镜下特征。Pl—斜长石; Qtz—石英; Se—绢云母; Ms—白云母

样品 PM408-21-1 采自三阳镇北余家冲(东经 113°11'19"、北纬 31°20'17"), 岩性为变质不等粒岩

屑石英砂岩, 变余不等粒砂状结构, 半定向构造, 岩石主要成分为石英(约 83%)、其他岩屑(主要为酸

性火山岩,约 9%)、钾长石(约 2%),少量杂基(约 3%)和铁质成分(约 3%)。各成分的粒度变化大,从细砂到巨砂皆有,磨圆度中等,多为次棱角或次圆状,少数为压扁次圆状,是经过一定距离搬运再沉积的产物。受区域变质作用影响,部分砂质碎屑物长轴有压扁拉长定向排列趋势而显半定向构造(图版 I-g,h)。

3 测试方法

本次研究的样品破碎后经手工淘洗分离出重砂,经磁选和电选后,在双目显微镜下对获取的重矿物进行人工挑纯。随机挑选出锆石颗粒用环氧树脂进行固定、抛光,并进行阴极发光(CL)和透射光、反射光照相,以观察各锆石颗粒内部的核、边和包裹体结构,用于锆石原位 U-Pb 同位素分析时选择测量点。锆石 U-Pb 同位素测量采用激光剥蚀电感耦合等离子质谱仪(LA-ICP-MS)原位分析方法,在湖北省地质实验测试中心实验室完成,测试仪器采用美国 Coherent Inc 公司生产的 GeoLasPro 全自动版 193nm ArF 准分子激光剥蚀系统(LA)和美国 Agilent 公司生产的 7700X 型电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)联用构成的激光剥蚀电感耦合等离子体质谱分析系统。锆石定年测试分析采用点剥蚀的方式,以 91500 为外标,以 GJ-1 为监控标样。测量时采用的激光束斑直径为 32 μm ,背景采集时间 10 s,样品剥蚀时间 40 s,管路吹扫时间 10 s,信号采集时间共 60 s^[17]。样品的同位素比值和元素含量采用 ICPMSDataCal 10.9 进行处理分析,加权平均年龄的计算及锆石年龄谐和图的绘制采用 Isoplot 4.0 软件完成^[18],具体操作方法及流程见参考文献[19-21]。

根据测试数据,分析时舍去谐和度小于 95% 的测试点,对测试锆石的年龄大于 1000 Ma 的采用 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 年龄,对小于 1000 Ma 的采用 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄,测试结果见表 1。

4 结果分析

4.1 剖面 PM203 样品

样品 PM203-12-1 的岩性为变质粗—中粒长

石英砂岩。该样品锆石以浑圆状为主,少量呈短柱状,颗粒较大(图 3)。这些锆石可以分为 2 类:一类颜色较浅,CL 图像较明亮,环带发育,显示岩浆锆石特征;另一类颜色较深,CL 图像较暗,环带类型多样,可见基性岩中常见的直纹等板状条带,亦有变质锆石无分带特征,暗示沉积物源的多样性。2 类锆石绝大多数具有较好的磨圆现象,指示物源具有一定的搬运距离。

本次共对 98 颗锆石进行了 U-Pb 定年分析,剔除谐和度低于 95% 的 12 个测试点,其余 86 个测试点仅 2 颗偏离谐和曲线,其他颗粒的分析结果均位于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上或其附近(图 4),锆石 Th/U 值大多大于 0.4,11 颗小于 0.4(表 1)。测年结果显示,最主要物源年龄在 750~900 Ma 之间,年龄峰值为 800 Ma 和 844 Ma,占物源的 94.2%,与扬子陆块特征碎屑锆石特征峰值一致^[22],显示强烈的亲扬子属性。其中,最年轻的 4 颗锆石平均年龄为 749 ± 14 Ma,限定了该套砂岩的最早沉积时代;2 颗(29 号点(Th/U=0.4)和 88 号点(Th/U=0.2))年龄为 2.6 Ga 的锆石,CL 图像较暗,环带不清晰,靠近不一致线,显示可能受变质影响(图 4)。

样品 PM203-17-1 岩性为变质酸性含晶屑凝灰岩。对 30 颗锆石进行了 U-Pb 定年分析(表 1),锆石呈粒状或短柱状,自形,大小多在 50 μm 左右,少数达 100 μm ,CL 图像显示环带发育(图 3),Th/U 值均大于 0.4,为典型火山岩锆石特点。剔除谐和度低于 95% 的测试点,剩余 11 颗锆石均在 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ — $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上,除去明显年龄较大的锆石(08 号点和 14 号点,可能为捕获锆石),剩余 9 颗锆石的年龄加权平均值为 732.9 ± 6.7 Ma(图 5),为火山凝灰岩的结晶年龄。

4.2 剖面 PM204 样品

样品 PM204-7-1 岩性为变质中粒长石石英砂岩。该样品锆石以浑圆状为主,少量呈短柱状,可见以 CL 图像振荡环带发育的酸性岩浆锆石为主、少量板状条纹的基性岩锆石(81 号点)和扇状环带的变质锆石(04 号点),显示该沉积岩的物源具有多样性。锆石绝大多数具有较好的磨圆度,指示物源距离较远,总体特征与 PM203-12-1 相似(图 3)。

表 1 样品锆石 U-Th-Pb 同位素测年结果

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotope dating results of the samples

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}Pb	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{206}Pb	1σ	$^{207}\text{Pb}/$ ^{235}Pb	1σ	$^{206}\text{Pb}/$ ^{238}U	1σ	
PM203-12-1																
01	77.5	182.4	0.4	0.0685	0.0013	1.3365	0.0267	0.1417	0.0020	883	38	862	12	855	12	99%
02	106.0	139.5	0.8	0.0656	0.0012	1.2075	0.0243	0.1337	0.0021	794	32	804	11	809	12	99%
03	187.7	277.2	0.7	0.1225	0.0015	5.9937	0.0984	0.3551	0.0055	1994	22	1975	14	1959	26	99%
04	73.4	161.6	0.5	0.0665	0.0014	1.2349	0.0300	0.1351	0.0023	833	38	817	14	817	13	99%
05	159.4	247.3	0.6	0.0662	0.0012	1.2645	0.0263	0.1387	0.0020	813	37	830	12	837	11	99%
06	65.8	129.2	0.5	0.0681	0.0012	1.2959	0.0260	0.1383	0.0021	872	37	844	11	835	12	98%
07	92.7	124.4	0.7	0.0638	0.0016	1.1110	0.0271	0.1270	0.0021	744	52	759	13	771	12	98%
08	264.5	482.3	0.5	0.0668	0.0009	1.2860	0.0242	0.1398	0.0023	831	-169	840	11	844	13	99%
09	329.1	467.2	0.7	0.0679	0.0009	1.3084	0.0192	0.1397	0.0017	878	28	849	8	843	10	99%
10	52.0	102.0	0.5	0.0662	0.0014	1.2400	0.0299	0.1362	0.0025	813	44	819	14	823	14	99%
11	21.2	72.2	0.3	0.0691	0.0020	1.4894	0.0436	0.1569	0.0028	902	60	926	18	939	15	98%
12	213.5	546.9	0.4	0.0698	0.0008	1.3569	0.0206	0.1405	0.0016	920	25	871	9	848	9	97%
13	68.8	158.0	0.4	0.0651	0.0011	1.1884	0.0269	0.1319	0.0024	776	33	795	13	799	14	99%
14	134.4	150.4	0.9	0.0630	0.0013	1.1044	0.0244	0.1274	0.0026	709	44	755	12	773	15	97%
15	73.8	130.9	0.6	0.0643	0.0015	1.1693	0.0290	0.1319	0.0027	752	48	786	14	799	15	98%
16	141.6	234.1	0.6	0.0648	0.0011	1.1615	0.0247	0.1300	0.0026	769	37	783	12	788	15	99%
17	131.8	229.4	0.6	0.0662	0.0011	1.2849	0.0304	0.1402	0.0027	813	36	839	14	846	15	99%
18	84.9	153.4	0.6	0.0667	0.0013	1.2929	0.0231	0.1409	0.0023	828	45	843	10	850	13	99%
19	34.8	73.6	0.5	0.0685	0.0019	1.3757	0.0400	0.1460	0.0026	883	55	879	17	879	15	99%
20	65.7	120.1	0.5	0.0652	0.0014	1.3114	0.0305	0.1455	0.0022	781	44	851	13	876	13	97%
21	33.1	69.7	0.5	0.0682	0.0019	1.3312	0.0389	0.1415	0.0024	876	58	859	17	853	13	99%
22	228.6	388.8	0.6	0.1567	0.0161	4.1502	0.5299	0.1673	0.0052	2420	175	1664	105	997	29	49%
23	114.9	210.3	0.5	0.0661	0.0013	1.2466	0.0250	0.1374	0.0029	809	41	822	11	830	16	99%
24	91.5	150.0	0.6	0.0663	0.0014	1.1962	0.0263	0.1315	0.0029	815	45	799	12	796	17	99%
25	138.0	158.8	0.9	0.0664	0.0014	1.2489	0.0309	0.1356	0.0021	820	46	823	14	820	12	99%
26	53.4	74.2	0.7	0.0681	0.0020	1.3204	0.0416	0.1402	0.0029	872	61	855	18	846	17	98%
27	125.4	270.7	0.5	0.0661	0.0011	1.2600	0.0301	0.1367	0.0026	811	40	828	14	826	15	99%
28	33.8	59.4	0.6	0.0810	0.0022	1.7619	0.0490	0.1572	0.0033	1222	54	1032	18	941	18	90%
29	67.8	174.2	0.4	0.1775	0.0023	12.6689	0.2613	0.5126	0.0107	2631	21	2655	19	2668	45	99%
30	113.3	341.9	0.3	0.0664	0.0010	1.2860	0.0275	0.1394	0.0026	820	31	840	12	841	15	99%
31	225.0	279.9	0.8	0.0643	0.0011	1.1546	0.0268	0.1296	0.0028	754	35	779	13	786	16	99%
32	70.2	133.7	0.5	0.0680	0.0012	1.3318	0.0269	0.1415	0.0023	878	37	860	12	853	13	99%
33	49.1	83.6	0.6	0.0656	0.0019	1.1305	0.0325	0.1251	0.0024	794	55	768	15	760	14	98%
34	86.2	267.2	0.3	0.0680	0.0013	1.3153	0.0283	0.1406	0.0029	878	39	852	12	848	16	99%
35	183.7	276.2	0.7	0.0664	0.0013	1.2154	0.0277	0.1323	0.0020	820	36	808	13	801	11	99%

续表 1-1

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
36	38.3	301.3	0.1	0.0641	0.0010	1.0934	0.0228	0.1235	0.0020	746	40	750	11	751	11	99%
37	228.3	277.3	0.8	0.0664	0.0014	1.1921	0.0235	0.1313	0.0026	820	46	797	11	795	15	99%
38	197.7	294.5	0.7	0.0673	0.0014	1.2785	0.0336	0.1388	0.0036	848	47	836	15	838	20	99%
39	48.7	117.6	0.4	0.0651	0.0012	1.2795	0.0307	0.1421	0.0021	789	41	837	14	857	12	97%
40	111.7	234.1	0.5	0.0662	0.0012	1.2654	0.0318	0.1385	0.0028	813	39	830	14	836	16	99%
41	46.0	182.5	0.3	0.0650	0.0012	1.1517	0.0259	0.1283	0.0019	776	35	778	12	778	11	99%
42	161.6	350.1	0.5	0.0664	0.0011	1.2055	0.0268	0.1316	0.0023	820	35	803	12	797	13	99%
43	159.2	305.9	0.5	0.0659	0.0011	1.2205	0.0236	0.1343	0.0021	806	34	810	11	812	12	99%
44	31.9	89.7	0.4	0.0660	0.0017	1.1684	0.0308	0.1290	0.0025	806	54	786	14	782	14	99%
45	89.1	212.1	0.4	0.0670	0.0012	1.2899	0.0257	0.1397	0.0020	839	-163	841	11	843	11	99%
46	33.1	118.5	0.3	0.0681	0.0014	1.3237	0.0317	0.1410	0.0021	872	47	856	14	850	12	99%
47	102.5	215.0	0.5	0.0670	0.0012	1.2368	0.0258	0.1341	0.0021	839	38	817	12	811	12	99%
48	59.6	95.4	0.6	0.0666	0.0013	1.2365	0.0301	0.1349	0.0022	833	41	817	14	815	13	99%
49	151.9	276.1	0.6	0.0662	0.0012	1.2003	0.0235	0.1316	0.0015	813	37	801	11	797	8	99%
50	118.9	149.0	0.8	0.0659	0.0012	1.1764	0.0223	0.1293	0.0016	806	39	790	10	784	9	99%
51	120.6	364.8	0.3	0.0694	0.0009	1.3883	0.0196	0.1449	0.0016	909	27	884	8	872	9	98%
52	140.5	238.5	0.6	0.0664	0.0010	1.2681	0.0226	0.1383	0.0019	818	31	832	10	835	11	99%
53	83.3	135.4	0.6	0.0710	0.0015	1.5041	0.0373	0.1530	0.0022	967	41	932	15	918	13	98%
54	117.7	118.4	1.0	0.0724	0.0014	1.3154	0.0245	0.1317	0.0018	996	40	852	11	798	10	93%
55	66.6	101.2	0.7	0.0660	0.0019	1.1885	0.0327	0.1306	0.0021	806	59	795	15	791	12	99%
56	26.8	69.3	0.4	0.0701	0.0020	1.4347	0.0395	0.1486	0.0028	931	57	904	16	893	16	98%
57	115.9	271.2	0.4	0.0668	0.0011	1.2210	0.0263	0.1324	0.0027	831	32	810	12	801	15	98%
58	45.9	143.6	0.3	0.1141	0.0017	5.0252	0.1105	0.3195	0.0072	1865	26	1824	19	1787	35	97%
59	106.8	133.0	0.8	0.0641	0.0013	1.1639	0.0280	0.1314	0.0024	746	43	784	13	796	14	98%
60	80.9	96.7	0.8	0.0672	0.0015	1.1928	0.0278	0.1289	0.0023	843	44	797	13	781	13	98%
61	49.3	85.8	0.6	0.0657	0.0015	1.1893	0.0322	0.1314	0.0029	798	46	796	15	796	17	99%
62	26.6	61.9	0.4	0.0662	0.0017	1.3692	0.0416	0.1496	0.0027	813	49	876	18	899	15	97%
63	149.1	564.1	0.3	0.0751	0.0019	1.6203	0.0585	0.1545	0.0021	1070	52	978	23	926	12	94%
64	67.5	139.9	0.5	0.0644	0.0012	1.1221	0.0258	0.1266	0.0026	767	39	764	12	769	15	99%
65	142.5	154.3	0.9	0.0641	0.0012	1.0874	0.0259	0.1228	0.0022	746	39	747	13	747	12	99%
66	74.2	141.2	0.5	0.0661	0.0013	1.1936	0.0244	0.1314	0.0023	809	42	798	11	796	13	99%
67	191.2	222.0	0.9	0.0654	0.0012	1.1892	0.0239	0.1318	0.0020	787	42	796	11	798	11	99%
68	22.6	56.9	0.4	0.0646	0.0019	1.1035	0.0377	0.1245	0.0028	761	62	755	18	756	16	99%
69	51.6	120.5	0.4	0.0649	0.0013	1.1505	0.0264	0.1284	0.0020	772	43	777	12	778	12	99%
70	85.9	144.7	0.6	0.0667	0.0015	1.1688	0.0285	0.1272	0.0021	828	44	786	13	772	12	98%
71	110.1	187.3	0.6	0.0666	0.0013	1.2247	0.0268	0.1331	0.0019	828	47	812	12	805	11	99%
72	165.7	411.9	0.4	0.0665	0.0010	1.2912	0.0265	0.1405	0.0023	820	31	842	12	848	13	99%

续表 1-2

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
73	37.4	79.6	0.5	0.0654	0.0016	1.1515	0.0285	0.1285	0.0026	787	46	778	13	779	15	99%
74	225.8	239.4	0.9	0.1239	0.0015	6.2074	0.0988	0.3629	0.0051	2014	20	2005	14	1996	24	99%
75	62.6	207.0	0.3	0.0680	0.0012	1.3287	0.0255	0.1417	0.0017	878	35	858	11	854	10	99%
76	18.1	42.1	0.4	0.0688	0.0021	1.3098	0.0457	0.1381	0.0027	894	63	850	20	834	15	98%
77	49.7	85.1	0.6	0.0712	0.0025	1.4758	0.0513	0.1509	0.0021	965	68	921	21	906	12	98%
78	96.5	199.0	0.5	0.0677	0.0014	1.2788	0.0276	0.1372	0.0017	859	43	836	12	829	10	99%
79	193.9	239.3	0.8	0.1159	0.0014	4.0570	0.0683	0.2535	0.0031	1894	21	1646	14	1457	16	87%
80	67.4	90.5	0.7	0.0664	0.0016	1.3146	0.0362	0.1439	0.0028	820	55	852	16	867	16	98%
81	96.5	124.5	0.8	0.0659	0.0016	1.2265	0.0288	0.1370	0.0035	1200	52	813	13	828	20	98%
82	47.9	107.3	0.4	0.0636	0.0017	1.0790	0.0292	0.1238	0.0027	728	57	743	14	752	16	98%
83	96.8	160.5	0.6	0.0640	0.0015	1.0744	0.0257	0.1223	0.0024	743	48	741	13	744	14	99%
84	216.9	471.8	0.5	0.0667	0.0011	1.2239	0.0251	0.1331	0.0026	831	33	812	11	805	15	99%
85	67.1	127.8	0.5	0.0642	0.0015	1.1272	0.0337	0.1268	0.0025	746	48	766	16	770	14	99%
86	21.1	51.4	0.4	0.0687	0.0065	1.3076	0.0498	0.1499	0.0053	900	196	849	22	900	29	94%
87	57.2	146.4	0.4	0.0632	0.0014	1.1659	0.0277	0.1342	0.0024	717	50	785	13	812	14	96%
88	29.6	131.8	0.2	0.1786	0.0027	13.6542	0.3144	0.5545	0.0108	2640	25	2726	22	2844	45	95%
89	237.0	309.6	0.8	0.0583	0.0011	1.1832	0.0265	0.1469	0.0016	543	41	793	12	884	9	89%
90	45.5	74.1	0.6	0.0612	0.0020	1.0975	0.0360	0.1312	0.0027	656	73	752	17	795	16	94%
91	157.4	254.8	0.6	0.0586	0.0015	1.0825	0.0344	0.1340	0.0023	550	56	745	17	811	13	91%
92	68.3	111.4	0.6	0.0583	0.0017	1.0475	0.0375	0.1306	0.0027	539	65	728	19	791	16	91%
93	80.0	135.0	0.6	0.0601	0.0016	1.1615	0.0382	0.1401	0.0027	609	57	783	18	845	15	92%
94	231.5	298.9	0.8	0.0589	0.0013	1.1301	0.0325	0.1398	0.0031	565	45	768	15	843	17	90%
95	70.3	125.0	0.6	0.0595	0.0014	1.1371	0.0311	0.1391	0.0027	587	19	771	15	839	15	91%
96	18.7	50.2	0.4	0.0672	0.0023	1.2888	0.0456	0.1397	0.0024	844	75	841	20	843	14	99%
97	42.6	70.9	0.6	0.0625	0.0020	1.1827	0.0364	0.1387	0.0031	700	72	793	17	837	17	94%
98	56.6	106.4	0.5	0.0640	0.0016	1.2162	0.0349	0.1379	0.0025	743	47	808	16	833	14	96%
PM203-17-1																
01	214.9	188.3	1.1	0.0757	0.0030	1.2701	0.0594	0.1216	0.0031	1087	80	832	27	740	18	88%
02	222.0	244.1	0.9	0.0666	0.0014	1.1190	0.0270	0.1211	0.0014	828	46	762	13	737	8	96%
03	107.9	116.8	0.9	0.1713	0.0114	3.2494	0.2538	0.1302	0.0031	2570	111	1469	61	789	18	39%
04	190.1	259.1	0.7	0.0742	0.0026	1.1280	0.0456	0.1095	0.0019	1048	70	767	22	670	11	86%
05	214.5	347.5	0.6	0.0685	0.0012	1.1548	0.0270	0.1219	0.0022	883	32	780	13	742	13	95%
06	71.4	192.8	0.4	0.0810	0.0025	1.0051	0.0315	0.0900	0.0015	1233	61	706	16	555	9	76%
07	269.2	446.7	0.6	0.0668	0.0010	1.1266	0.0232	0.1216	0.0019	831	-169	766	11	740	11	96%
08	77.6	142.8	0.5	0.0667	0.0012	1.2323	0.0287	0.1332	0.0020	828	38	815	13	806	12	98%
09	277.6	135.4	2.0	0.0863	0.0029	1.5678	0.0765	0.1288	0.0034	1346	65	958	30	781	19	79%
10	716.5	403.3	1.8	0.0698	0.0017	1.1606	0.0392	0.1190	0.0017	924	49	782	18	725	10	92%

续表 1-3

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ			
11	145.0	214.2	0.7	0.0737	0.0017	1.1178	0.0346	0.1090	0.0016	1031	45	762	17	667	9	86%
12	227.7	268.7	0.8	0.0723	0.0011	1.3180	0.0280	0.1317	0.0022	994	35	854	12	798	12	93%
13	105.9	104.8	1.0	0.0937	0.0051	1.4859	0.0923	0.1134	0.0019	1502	303	925	38	692	11	71%
14	140.7	340.6	0.4	0.0682	0.0012	1.1962	0.0272	0.1268	0.0023	876	35	799	13	770	13	96%
15	203.6	205.2	1.0	0.0761	0.0022	1.1787	0.0367	0.1119	0.0017	1098	57	791	17	684	10	85%
16	62.3	105.8	0.6	0.0685	0.0016	1.1572	0.0295	0.1224	0.0021	887	47	781	14	744	12	95%
17	181.3	277.1	0.7	0.1159	0.0114	2.4197	0.3064	0.1358	0.0045	1894	178	1248	91	821	26	58%
18	206.2	288.6	0.7	0.0645	0.0011	1.0831	0.0229	0.1212	0.0014	759	37	745	11	737	8	98%
19	169.3	170.3	1.0	0.0773	0.0025	1.1857	0.0342	0.1119	0.0014	1128	66	794	16	684	8	85%
20	237.3	365.0	0.7	0.0747	0.0019	1.2917	0.0393	0.1245	0.0020	1061	50	842	17	757	11	89%
21	167.6	158.0	1.1	0.0683	0.0016	1.0830	0.0287	0.1147	0.0017	880	48	745	14	700	10	93%
22	133.3	151.4	0.9	0.0836	0.0023	1.4122	0.0478	0.1222	0.0025	1283	54	894	20	743	14	81%
23	418.5	337.5	1.2	0.3313	0.0134	7.9555	0.4508	0.1650	0.0046	3623	62	2226	51	984	25	22%
24	143.4	176.8	0.8	0.0687	0.0014	1.0938	0.0292	0.1149	0.0019	900	39	750	14	701	11	93%
25	107.8	139.9	0.8	0.1148	0.0071	2.0757	0.1650	0.1246	0.0027	1876	112	1141	54	757	16	59%
26	99.4	123.3	0.8	0.0916	0.0055	1.4718	0.1291	0.1122	0.0026	1461	113	919	53	686	15	70%
27	281.1	176.7	1.6	0.0679	0.0017	1.1251	0.0341	0.1196	0.0018	878	53	765	16	728	10	95%
28	99.5	775.7	0.1	0.0659	0.0008	1.0683	0.0163	0.1174	0.0014	1200	26	738	8	715	8	96%
29	837.4	523.6	1.6	0.0668	0.0010	1.1139	0.0276	0.1203	0.0022	831	-169	760	13	732	13	96%
30	126.5	202.7	0.6	0.0658	0.0019	1.1012	0.0444	0.1207	0.0028	1200	61	754	21	735	16	97%
PM204-7-1																
01	127.9	268.5	0.5	0.0668	0.0008	1.2168	0.0182	0.1321	0.0014	831	26	808	8	800	8	98%
02	62.7	101.3	0.6	0.0654	0.0011	1.1241	0.0213	0.1249	0.0015	787	36	765	10	759	9	99%
03	194.4	246.8	0.8	0.0662	0.0009	1.2436	0.0227	0.1365	0.0021	813	30	821	10	825	12	99%
04	180.5	354.0	0.5	0.1138	0.0011	5.2690	0.0678	0.3356	0.0036	1861	18	1864	11	1865	17	99%
05	74.2	136.5	0.5	0.0660	0.0010	1.2668	0.0240	0.1392	0.0020	806	30	831	11	840	11	98%
06	26.0	74.4	0.3	0.0695	0.0016	1.5421	0.0428	0.1616	0.0034	917	49	947	17	966	19	98%
07	150.7	213.2	0.7	0.0642	0.0011	1.1387	0.0218	0.1290	0.0020	750	32	772	10	782	12	98%
08	265.5	328.8	0.8	0.0647	0.0009	1.1931	0.0229	0.1338	0.0023	765	25	797	11	810	13	98%
09	272.2	582.6	0.5	0.0674	0.0008	1.3165	0.0172	0.1415	0.0015	850	25	853	8	853	8	99%
10	164.0	325.6	0.5	0.0661	0.0012	1.2363	0.0233	0.1362	0.0024	809	38	817	11	823	14	99%
11	113.2	202.4	0.6	0.0665	0.0010	1.2514	0.0216	0.1361	0.0015	833	32	824	10	823	9	99%
12	187.5	411.4	0.5	0.0647	0.0008	1.1569	0.0171	0.1295	0.0015	765	26	780	8	785	9	99%
13	137.4	235.4	0.6	0.0931	0.0028	1.8105	0.0538	0.1408	0.0016	1500	57	1049	19	849	9	78%
14	71.9	83.2	0.9	0.0659	0.0015	1.2337	0.0332	0.1353	0.0021	1200	48	816	15	818	12	99%
15	43.6	208.5	0.2	0.0646	0.0012	1.1646	0.0231	0.1305	0.0017	761	240	784	11	791	9	99%
16	30.8	85.7	0.4	0.0684	0.0016	1.3778	0.0301	0.1467	0.0026	880	47	880	13	883	14	99%

续表 1-4

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
17	105.8	205.5	0.5	0.0667	0.0011	1.3091	0.0263	0.1420	0.0019	828	37	850	12	856	11	99%
18	90.7	128.7	0.7	0.0661	0.0012	1.2950	0.0292	0.1421	0.0026	809	42	844	13	857	15	98%
19	110.0	219.3	0.5	0.0690	0.0030	1.3191	0.0269	0.1435	0.0032	902	89	854	12	864	18	98%
20	68.2	163.4	0.4	0.0648	0.0012	1.1932	0.0262	0.1339	0.0026	769	37	797	12	810	15	98%
21	192.7	418.9	0.5	0.0661	0.0011	1.2812	0.0250	0.1407	0.0023	809	33	837	11	848	13	98%
22	249.9	313.2	0.8	0.0637	0.0011	1.2052	0.0249	0.1377	0.0026	731	35	803	11	831	15	96%
23	549.4	1329.8	0.4	0.0657	0.0008	1.2254	0.0165	0.1349	0.0012	798	31	812	8	816	7	99%
24	105.1	186.4	0.6	0.0713	0.0012	1.4299	0.0266	0.1452	0.0017	965	34	902	11	874	10	96%
25	102.8	146.9	0.7	0.0667	0.0012	1.2439	0.0242	0.1354	0.0022	831	35	821	11	819	12	99%
26	83.7	212.6	0.4	0.0709	0.0010	1.6568	0.0281	0.1692	0.0023	954	29	992	11	1008	12	98%
27	620.5	754.1	0.8	0.0663	0.0008	1.2525	0.0188	0.1367	0.0016	817	26	825	9	826	9	99%
28	130.8	141.1	0.9	0.0668	0.0011	1.2668	0.0239	0.1375	0.0019	831	35	831	11	830	11	99%
29	52.6	98.4	0.5	0.0641	0.0013	1.1988	0.0283	0.1360	0.0024	744	44	800	13	822	13	97%
30	161.8	330.2	0.5	0.0631	0.0009	1.1044	0.0190	0.1268	0.0016	722	30	755	9	770	9	98%
31	53.2	134.1	0.4	0.0842	0.0042	1.9192	0.1328	0.1584	0.0032	1298	96	1088	46	948	18	86%
32	263.9	371.1	0.7	0.0641	0.0009	1.2087	0.0231	0.1367	0.0016	743	27	805	11	826	9	97%
33	134.9	263.8	0.5	0.0636	0.0010	1.2116	0.0286	0.1385	0.0025	728	34	806	13	836	14	96%
34	285.9	487.0	0.6	0.0657	0.0011	1.3146	0.0288	0.1452	0.0019	798	35	852	13	874	11	97%
35	190.5	195.5	1.0	0.0624	0.0014	1.2595	0.0310	0.1469	0.0021	687	51	828	14	883	12	93%
36	141.8	399.9	0.4	0.0601	0.0024	1.1876	0.0268	0.1383	0.0024	606	92	795	12	835	14	95%
37	199.7	282.7	0.7	0.0585	0.0017	1.0921	0.0299	0.1313	0.0022	550	65	750	15	795	13	94%
38	92.5	162.0	0.6	0.0615	0.0013	1.2143	0.0269	0.1437	0.0020	654	44	807	12	865	11	93%
39	209.6	407.6	0.5	0.0645	0.0009	1.2910	0.0239	0.1455	0.0025	759	31	842	11	875	14	96%
40	167.5	269.5	0.6	0.0692	0.0014	1.4451	0.0274	0.1515	0.0017	906	41	908	11	909	9	99%
41	198.2	383.6	0.5	0.0668	0.0011	1.3376	0.0261	0.1445	0.0015	831	33	862	11	870	8	99%
42	72.8	430.4	0.2	0.0657	0.0009	1.3458	0.0242	0.1481	0.0020	794	34	866	10	890	11	97%
43	151.8	196.4	0.8	0.0653	0.0011	1.1940	0.0220	0.1321	0.0019	785	35	798	10	800	11	99%
44	521.8	746.3	0.7	0.0649	0.0008	1.2113	0.0168	0.1347	0.0015	772	26	806	8	815	8	98%
45	191.5	376.9	0.5	0.0658	0.0009	1.3021	0.0225	0.1427	0.0019	1200	30	847	10	860	11	98%
46	55.2	126.5	0.4	0.0703	0.0014	1.3848	0.0309	0.1423	0.0021	1000	42	882	13	858	12	97%
47	117.0	198.3	0.6	0.0657	0.0012	1.2378	0.0249	0.1365	0.0024	794	33	818	11	825	14	99%
48	106.0	184.5	0.6	0.0665	0.0012	1.2892	0.0291	0.1399	0.0027	833	38	841	13	844	15	99%
49	173.7	377.9	0.5	0.0664	0.0011	1.2732	0.0253	0.1384	0.0024	817	34	834	11	835	14	99%
50	41.9	104.7	0.4	0.0686	0.0016	1.3671	0.0361	0.1441	0.0033	887	81	875	15	868	19	99%
51	58.4	81.2	0.7	0.0667	0.0017	1.2821	0.0331	0.1396	0.0026	828	54	838	15	842	15	99%
52	120.2	415.9	0.3	0.0676	0.0010	1.3684	0.0252	0.1466	0.0026	857	27	875	11	882	15	99%
53	306.6	506.0	0.6	0.0647	0.0009	1.1785	0.0189	0.1317	0.0018	765	29	791	9	797	10	99%

续表 1-5

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
54	44.4	72.2	0.6	0.1362	0.0037	2.0940	0.0459	0.1132	0.0024	2179	48	1146	15	694	14	50%
55	167.3	319.5	0.5	0.0658	0.0010	1.2471	0.0241	0.1370	0.0019	1200	31	822	11	828	11	99%
56	247.1	390.7	0.6	0.0658	0.0011	1.2754	0.0273	0.1405	0.0022	798	37	835	12	848	13	98%
57	153.5	393.4	0.4	0.0666	0.0011	1.2900	0.0291	0.1405	0.0025	833	34	841	13	848	14	99%
58	43.3	89.0	0.5	0.0665	0.0015	1.2582	0.0297	0.1378	0.0024	820	45	827	13	832	14	99%
59	559.0	527.2	1.1	0.0662	0.0009	1.2342	0.0210	0.1350	0.0018	813	27	816	10	816	10	99%
60	54.7	156.3	0.4	0.0653	0.0011	1.2017	0.0258	0.1331	0.0018	783	36	801	12	806	10	99%
61	405.5	223.9	0.5	0.0976	0.0105	1.8512	0.2094	0.1333	0.0029	1589	203	1064	75	806	16	72%
62	44.1	84.4	0.5	0.0678	0.0016	1.2943	0.0322	0.1386	0.0022	865	49	843	14	837	13	99%
63	35.2	61.8	0.6	0.0700	0.0016	1.4760	0.0411	0.1528	0.0030	929	46	921	17	916	17	99%
64	116.8	225.1	0.5	0.0686	0.0011	1.3642	0.0304	0.1437	0.0022	887	34	874	13	865	13	99%
65	256.0	352.1	0.7	0.0657	0.0010	1.2241	0.0266	0.1351	0.0025	796	33	812	12	817	14	99%
66	127.0	198.4	0.6	0.0706	0.0015	1.3215	0.0300	0.1356	0.0020	946	43	855	13	820	11	95%
67	426.2	421.8	1.0	0.0666	0.0009	1.1955	0.0209	0.1297	0.0017	828	28	799	10	786	10	98%
68	69.0	293.6	0.2	0.0652	0.0009	1.2053	0.0190	0.1340	0.0019	789	30	803	9	811	11	99%
69	140.6	167.1	0.8	0.0672	0.0011	1.2643	0.0214	0.1363	0.0017	843	33	830	10	824	9	99%
70	70.9	84.5	0.8	0.0664	0.0015	1.2297	0.0300	0.1342	0.0023	818	46	814	14	812	13	99%
71	116.6	260.1	0.4	0.0672	0.0009	1.3310	0.0217	0.1429	0.0018	856	29	859	9	861	10	99%
72	145.2	391.2	0.4	0.0644	0.0010	1.1469	0.0204	0.1291	0.0023	754	31	776	10	783	13	99%
73	222.3	285.5	0.8	0.0698	0.0010	1.3612	0.0250	0.1409	0.0024	924	30	872	11	850	13	97%
74	84.4	163.3	0.5	0.0681	0.0011	1.3573	0.0239	0.1438	0.0019	872	33	871	10	866	11	99%
75	170.4	280.6	0.6	0.0643	0.0010	1.1474	0.0182	0.1290	0.0018	752	33	776	9	782	10	99%
76	120.6	308.7	0.4	0.0646	0.0010	1.1377	0.0203	0.1271	0.0019	761	31	771	10	771	11	99%
77	145.4	170.5	0.9	0.0678	0.0013	1.2743	0.0309	0.1353	0.0024	861	40	834	14	818	14	98%
78	216.6	421.3	0.5	0.0658	0.0010	1.2357	0.0211	0.1356	0.0019	798	31	817	10	820	11	99%
79	67.1	86.1	0.8	0.0663	0.0016	1.2314	0.0309	0.1348	0.0024	817	50	815	14	815	14	99%
80	98.7	196.5	0.5	0.0676	0.0011	1.3016	0.0252	0.1391	0.0018	857	33	846	11	840	10	99%
81	78.5	94.1	0.8	0.0671	0.0014	1.2381	0.0271	0.1339	0.0018	840	44	818	12	810	11	99%
82	175.3	600.9	0.3	0.0673	0.0007	1.3144	0.0204	0.1413	0.0018	856	22	852	9	852	10	99%
83	171.3	281.1	0.6	0.0653	0.0010	1.1731	0.0207	0.1304	0.0017	783	32	788	10	790	10	99%
84	33.9	54.4	0.6	0.0673	0.0016	1.2807	0.0323	0.1393	0.0028	856	50	837	14	841	16	99%
85	84.5	181.3	0.5	0.0667	0.0013	1.3385	0.0304	0.1460	0.0024	828	40	863	13	879	13	98%
86	212.5	467.8	0.5	0.0672	0.0015	1.2583	0.0249	0.1376	0.0027	856	51	827	11	831	15	99%
87	180.8	246.5	0.7	0.0640	0.0009	1.1537	0.0223	0.1306	0.0020	743	31	779	11	792	12	98%
88	70.4	144.4	0.5	0.0626	0.0011	1.0879	0.0215	0.1258	0.0019	694	37	748	10	764	11	97%
89	306.4	479.9	0.6	0.0659	0.0009	1.2607	0.0199	0.1380	0.0020	806	28	828	9	833	11	99%
90	132.1	165.8	0.8	0.0659	0.0013	1.2521	0.0271	0.1370	0.0022	803	47	824	12	828	13	99%

续表 1-6

测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
91	309.6	309.0	1.0	0.0904	0.0028	1.1082	0.0280	0.0930	0.0036	1433	59	757	13	573	21	72%
92	30.4	68.7	0.4	0.0688	0.0020	1.3834	0.0394	0.1452	0.0030	892	61	882	17	874	17	99%
93	97.9	127.1	0.8	0.0652	0.0015	1.2790	0.0312	0.1410	0.0033	789	50	836	14	850	19	98%
94	93.6	130.6	0.7	0.0681	0.0016	1.3114	0.0295	0.1381	0.0031	872	44	851	13	834	18	97%
95	44.7	72.4	0.6	0.0646	0.0016	1.1943	0.0291	0.1336	0.0033	761	52	798	13	808	19	98%
96	163.6	243.5	0.7	0.0671	0.0013	1.2973	0.0240	0.1392	0.0027	839	-160	845	11	840	15	99%
97	97.3	129.1	0.8	0.0665	0.0013	1.2614	0.0264	0.1363	0.0026	822	39	829	12	824	15	99%
98	131.5	204.9	0.6	0.0679	0.0011	1.3254	0.0206	0.1406	0.0022	878	35	857	9	848	13	98%
99	47.0	76.9	0.6	0.0706	0.0015	1.5126	0.0346	0.1544	0.0027	946	44	936	14	926	15	98%
100	38.0	89.6	0.4	0.0664	0.0016	1.2074	0.0310	0.1315	0.0024	820	55	804	14	796	14	99%
101	243.3	200.6	1.2	0.0634	0.0010	1.0963	0.0222	0.1246	0.0018	720	33	752	11	757	11	99%
PM408-21-1																
01	194.2	178.2	1.1	0.0681	0.0010	1.1341	0.0155	0.1212	0.0013	872	31	770	7	737	8	95%
02	220.4	150.8	1.5	0.0649	0.0010	1.0976	0.0195	0.1227	0.0015	770	232	752	9	746	9	99%
03	362.3	477.3	0.8	0.0664	0.0007	1.0785	0.0141	0.1176	0.0011	820	20	743	7	717	6	96%
04	175.1	106.2	1.6	0.1274	0.0059	1.8149	0.0800	0.1047	0.0012	2063	82	1051	29	642	7	51%
05	186.4	161.2	1.2	0.0642	0.0011	1.0686	0.0181	0.1210	0.0014	750	32	738	9	736	8	99%
06	202.4	238.6	0.8	0.0637	0.0008	1.0559	0.0163	0.1201	0.0013	731	31	732	8	731	8	99%
07	95.4	89.5	1.1	0.0785	0.0034	1.1954	0.0417	0.1127	0.0017	1161	92	798	19	688	10	85%
08	221.8	154.4	1.4	0.0662	0.0010	1.0859	0.0171	0.1190	0.0011	813	33	747	8	725	6	97%
09	382.2	320.7	1.2	0.0648	0.0008	1.0704	0.0155	0.1197	0.0013	769	26	739	8	729	8	98%
10	127.4	103.7	1.2	0.0676	0.0011	1.1567	0.0206	0.1242	0.0012	855	40	780	10	755	7	96%
11	27.4	37.7	0.7	0.0760	0.0031	1.0284	0.0404	0.0989	0.0014	1094	80	718	20	608	8	83%
12	364.9	167.0	2.2	0.0643	0.0009	1.0565	0.0149	0.1194	0.0013	750	34	732	7	727	8	99%
13	75.3	88.9	0.8	0.0630	0.0011	1.0535	0.0199	0.1213	0.0014	709	37	731	10	738	8	98%
14	256.0	215.2	1.2	0.0647	0.0008	1.0939	0.0154	0.1226	0.0011	765	23	750	7	746	6	99%
15	257.9	204.0	1.3	0.0638	0.0008	1.0849	0.0186	0.1232	0.0015	744	26	746	9	749	9	99%
16	267.9	116.6	2.3	0.0651	0.0011	1.1252	0.0215	0.1255	0.0018	789	35	765	10	762	10	99%
17	372.1	269.4	1.4	0.0648	0.0007	1.1211	0.0178	0.1254	0.0015	769	24	763	9	762	9	99%
18	236.5	129.4	1.8	0.0638	0.0010	1.0428	0.0196	0.1184	0.0013	744	31	725	10	721	7	99%
19	376.5	335.5	1.1	0.0661	0.0007	1.1321	0.0147	0.1241	0.0011	809	22	769	7	754	6	98%
20	197.9	83.4	2.4	0.0645	0.0011	1.0619	0.0201	0.1196	0.0015	767	35	735	10	728	8	99%
21	1780.5	518.4	3.4	0.0642	0.0006	1.0646	0.0129	0.1202	0.0011	750	20	736	6	732	6	99%
22	272.0	225.1	1.2	0.0642	0.0008	1.1319	0.0160	0.1278	0.0012	750	26	769	8	775	7	99%
23	146.6	133.0	1.1	0.0643	0.0010	1.1672	0.0202	0.1318	0.0015	754	31	785	9	798	9	98%
24	408.6	197.7	2.1	0.0639	0.0009	1.0610	0.0163	0.1205	0.0013	739	30	734	8	734	7	99%
25	372.4	298.2	1.2	0.0630	0.0007	1.0986	0.0155	0.1264	0.0012	709	24	753	8	768	7	98%

续表 1-7

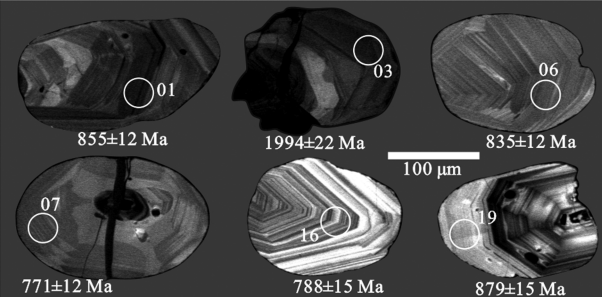
测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$		$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$		$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$		
				1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		1σ		
26	452.6	347.8	1.3	0.0634	0.0007	1.0530	0.0149	0.1205	0.0014	720	22	730	7	734	8	99%
27	480.5	443.2	1.6	0.0695	0.0011	1.1577	0.0210	0.1210	0.0015	922	33	781	10	737	9	94%
28	414.9	130.1	3.2	0.0688	0.0013	1.1720	0.0227	0.1237	0.0015	900	38	788	11	752	9	95%
29	123.2	73.2	1.7	0.0649	0.0013	1.1121	0.0243	0.1243	0.0016	772	44	759	12	755	9	99%
30	801.3	413.3	1.9	0.0643	0.0006	1.1430	0.0160	0.1287	0.0015	750	19	774	8	780	9	99%
31	189.2	171.2	1.1	0.0663	0.0011	1.1232	0.0204	0.1228	0.0015	817	34	765	10	747	9	97%
32	388.3	120.3	3.2	0.0648	0.0012	1.0682	0.0214	0.1192	0.0013	769	37	738	11	726	8	98%
33	217.2	273.4	0.8	0.0647	0.0008	1.1215	0.0177	0.1256	0.0015	765	23	764	8	763	9	99%
34	134.1	145.6	0.9	0.0674	0.0010	1.1779	0.0182	0.1265	0.0013	850	30	790	9	768	8	97%
35	208.9	145.2	1.4	0.0645	0.0010	1.1213	0.0185	0.1261	0.0015	767	33	764	9	765	9	99%
36	275.2	267.7	1.0	0.0725	0.0017	1.1959	0.0266	0.1197	0.0012	1011	51	799	12	729	7	90%
37	84.5	61.8	1.4	0.0658	0.0014	1.1497	0.0239	0.1271	0.0015	800	51	777	11	771	9	99%
38	153.2	115.8	1.3	0.0667	0.0010	1.1858	0.0210	0.1287	0.0015	828	30	794	10	780	9	98%
39	283.6	407.3	0.7	0.0658	0.0007	1.1783	0.0137	0.1296	0.0011	1200	22	791	6	786	6	99%
40	332.8	236.4	1.4	0.0655	0.0009	1.1537	0.0185	0.1275	0.0012	791	28	779	9	774	7	99%
41	430.2	377.8	1.1	0.0640	0.0008	1.1030	0.0139	0.1249	0.0010	743	25	755	7	759	6	99%
42	128.1	107.7	1.2	0.0678	0.0010	1.2335	0.0175	0.1322	0.0013	861	33	816	8	801	7	98%
43	225.9	122.8	1.8	0.0682	0.0014	1.1697	0.0269	0.1243	0.0018	876	41	786	13	755	10	95%
44	331.4	303.4	1.1	0.0660	0.0008	1.2051	0.0193	0.1322	0.0018	807	24	803	9	801	10	99%
45	127.6	73.8	1.7	0.0811	0.0025	1.1782	0.0570	0.1303	0.0020	1225	60	921	23	790	11	84%
46	123.5	155.5	0.8	0.0651	0.0010	1.1450	0.0200	0.1275	0.0017	789	31	775	9	774	10	99%
47	91.2	55.3	1.6	0.0661	0.0015	1.1294	0.0272	0.1240	0.0016	809	48	767	13	753	9	98%
48	71.0	53.5	1.3	0.0657	0.0015	1.1227	0.0250	0.1245	0.0018	798	53	764	12	756	10	98%
49	104.9	149.1	0.7	0.0650	0.0009	1.0690	0.0183	0.1189	0.0013	774	228	738	9	724	7	98%
50	175.1	79.7	2.2	0.0656	0.0013	1.1723	0.0272	0.1295	0.0018	794	41	788	13	785	10	99%
51	68.1	95.3	0.7	0.0656	0.0011	1.1296	0.0202	0.1248	0.0014	794	31	768	10	758	8	98%
52	248.1	387.4	0.6	0.0645	0.0006	1.1401	0.0163	0.1279	0.0015	767	25	773	8	776	9	99%
53	232.1	229.5	1.0	0.0643	0.0008	1.1157	0.0180	0.1255	0.0014	754	32	761	9	762	8	99%
54	324.7	322.2	1.0	0.0654	0.0007	1.1130	0.0154	0.1233	0.0013	787	22	760	7	749	8	98%
55	127.2	197.0	0.6	0.0878	0.0026	1.15835	0.0558	0.1296	0.0016	1377	57	964	22	785	9	79%
56	164.1	130.0	1.3	0.0687	0.0010	1.1801	0.0204	0.1245	0.0013	889	31	791	10	756	8	95%
57	287.9	418.2	0.7	0.0651	0.0007	1.1206	0.0178	0.1245	0.0016	789	217	763	9	757	9	99%
58	673.5	602.2	1.1	0.0658	0.0007	1.0741	0.0144	0.1182	0.0013	1200	16	741	7	720	8	97%
59	227.2	130.0	1.7	0.0649	0.0010	1.1023	0.0186	0.1231	0.0014	772	33	754	9	748	8	99%
60	136.7	118.0	1.2	0.0654	0.0012	1.1129	0.0199	0.1237	0.0017	789	39	760	10	752	10	98%
61	445.8	256.4	1.7	0.0651	0.0008	1.1794	0.0185	0.1314	0.0019	789	25	791	9	796	11	99%
62	205.2	215.7	1.0	0.0646	0.0007	1.1221	0.0162	0.1258	0.0014	761	25	764	8	764	8	99%

续表 1-8

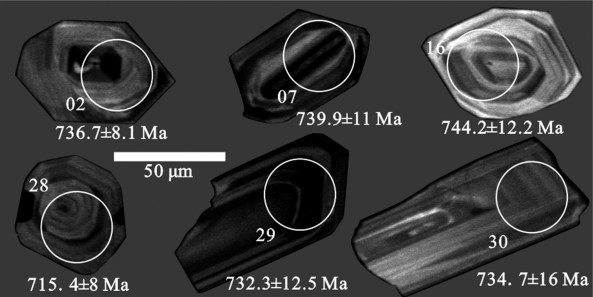
测试点号	元素含量/ 10^{-6}		Th/U	比值						年龄/Ma						谐和度
	^{232}Th	^{238}U		$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	
63	224.9	158.9	1.4	0.0632	0.0009	1.0569	0.0165	0.1212	0.0012	722	30	732	8	737	7	99%
64	327.0	242.9	1.3	0.0646	0.0008	1.1029	0.0166	0.1237	0.0013	761	27	755	8	752	7	99%
65	55.5	66.0	0.8	0.0640	0.0013	1.1103	0.0254	0.1258	0.0018	743	41	758	12	764	11	99%
66	57.7	66.5	0.9	0.0660	0.0013	1.1176	0.0245	0.1229	0.0016	806	45	762	12	747	9	98%
67	395.7	295.2	1.3	0.0648	0.0008	1.1484	0.0162	0.1283	0.0013	769	26	776	8	778	7	99%
68	172.9	188.9	0.9	0.0632	0.0008	1.1505	0.0209	0.1319	0.0020	717	29	777	10	799	11	97%
69	311.1	303.3	1.0	0.0643	0.0007	1.1046	0.0140	0.1245	0.0012	754	24	756	7	756	7	99%
70	172.9	162.6	1.1	0.0638	0.0009	1.0789	0.0162	0.1226	0.0014	744	28	743	8	745	8	99%
71	298.6	181.8	1.6	0.0658	0.0009	1.1672	0.0187	0.1285	0.0013	800	28	785	9	779	8	99%
72	847.4	455.1	1.9	0.0710	0.0014	1.2518	0.0272	0.1274	0.0012	967	40	824	12	773	7	93%
73	208.1	136.3	1.5	0.0685	0.0013	1.0861	0.0242	0.1153	0.0020	883	39	747	12	703	11	94%
74	340.5	549.4	0.6	0.0638	0.0006	1.0956	0.0144	0.1244	0.0013	744	17	751	7	756	7	99%
75	106.4	65.7	1.6	0.0645	0.0014	1.0732	0.0240	0.1207	0.0016	767	239	740	12	735	9	99%
76	350.7	159.2	2.2	0.0643	0.0008	1.1452	0.0204	0.1289	0.0015	750	28	775	10	781	8	99%
77	618.8	310.4	2.0	0.0655	0.0008	1.1081	0.0166	0.1225	0.0012	791	26	757	8	745	7	98%
78	497.3	271.2	1.8	0.0653	0.0008	1.1058	0.0142	0.1227	0.0011	783	25	756	7	746	6	98%
79	326.1	381.2	0.9	0.0000	0.0000	0.8956	0.0556	0.0966	0.0021	error	error	649	30	594	12	91%
80	125.1	96.5	1.3	0.0647	0.0013	1.1100	0.0227	0.1244	0.0014	765	41	758	11	756	8	99%

注:划横线的数据代表舍弃数据

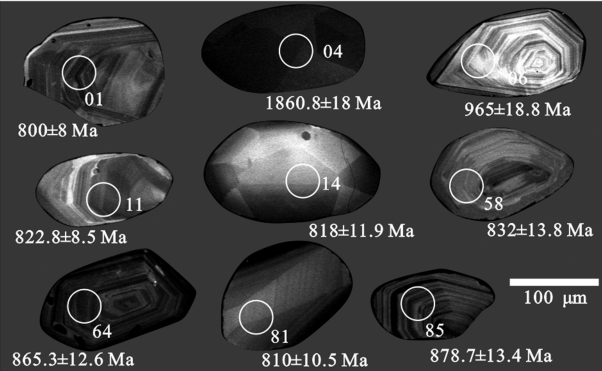
PM203-12-1 (变质粗-中粒长石石英砂岩)



PM203-17-1 (变质酸性含晶屑凝灰岩)



PM204-7-1 (变质中粒长石石英砂岩)



PM408-21-1 (变质不等粒岩屑石英砂岩)

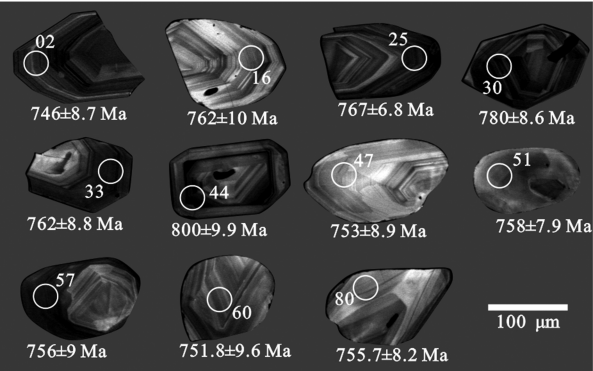


图 3 武当群样品锆石阴极发光(CL)图像

Fig. 3 CL images of zircons in the dating samples of Wudang Group

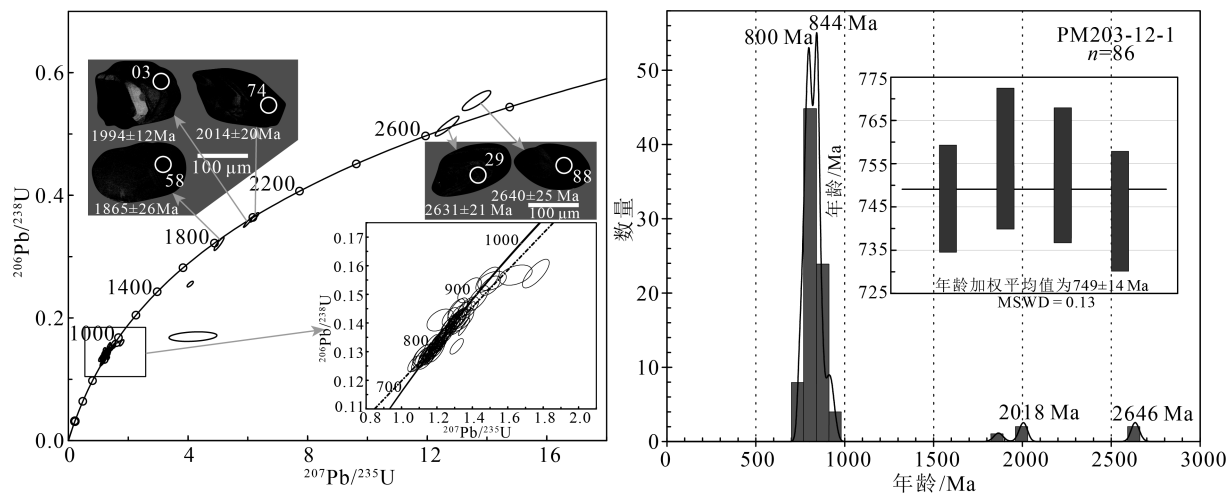


图4 武当群样品 PM203-12-1 碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图和年龄频率直方图

Fig. 4 U-Pb age concordias and age histograms of detrital zircons from Wudang Group (PM203-12-1)

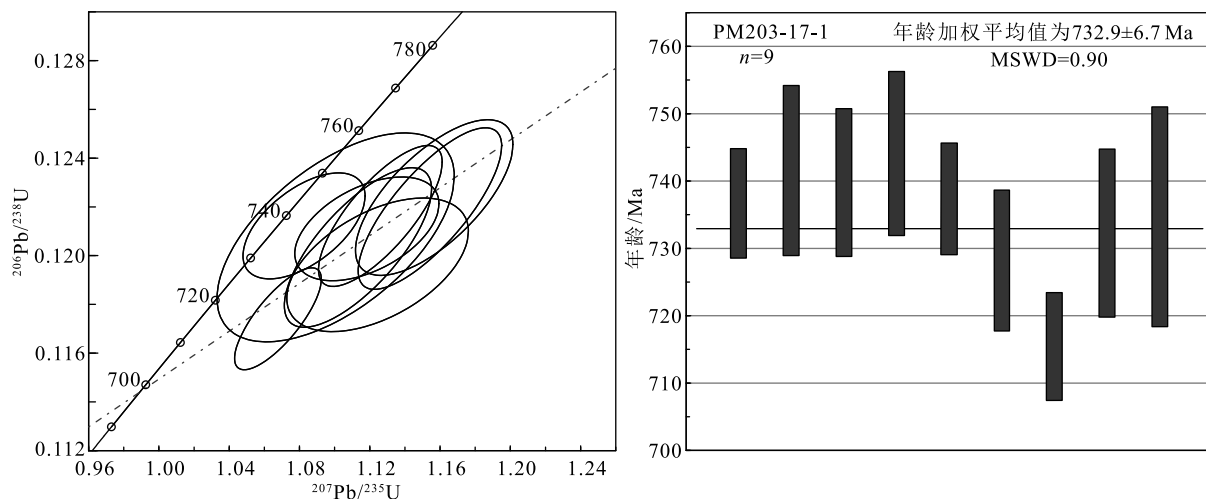


图5 武当群样品 PM203-17-1 岩浆锆石 U-Pb 年龄谐和图和平均年龄图

Fig. 5 Concordia plots and the mean ages of magmatic zircon U-Pb dating for Wudang Group (PM203-17-1)

对该样品 101 粒锆石进行了分析,去除 8 个谐和度小于 95% 的测点,其余 93 个测点的分析结果均落于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上。Th/U 值大多大于 0.4,有 6 颗小于 0.4 (表 1)。测年结果显示,最主要年龄峰值为 825 Ma,占据物源的 97%,显示出强烈的亲扬子特点^[22]。该样品中最年轻的 4 颗锆石平均年龄为 762.0 ± 9.9 Ma (图 6-a、b),限定了该套砂岩的最早沉积时代。

4.3 剖面 PM408 样品

样品 PM408-21-1 岩性为变质不等粒岩屑石英砂岩。该样品锆石以短柱状、长柱状和粒状为主,多自形、棱角状,少量具一定磨圆度,锆石大小以

100~200 μm 为主,CL 图像显示绝大多数锆石发育较好的振荡环带 (图 3),且以酸性岩浆岩锆石为主。整体显示出物源相对单一、搬运距离较近的特征。

对该样品 80 颗锆石进行了 U-Pb 定年分析,剔除谐和度低于 95% 的 18 个测试点,其余 70 颗锆石年龄的分析结果均位于 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ – $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和线上或其附近 (图 6-c、d),Th/U 值均大于 0.4 (表 1)。这些锆石测年结果显示,唯一峰值年龄为 754 Ma,其中最年轻的 9 颗锆石自形程度好,颗粒较小,呈短柱状,CL 图像显示振荡环带发育,结合该样品薄片中发现存在 9% 左右的酸性火山岩岩屑,推测为酸性火山岩锆石,可能属于火山岩再循环形

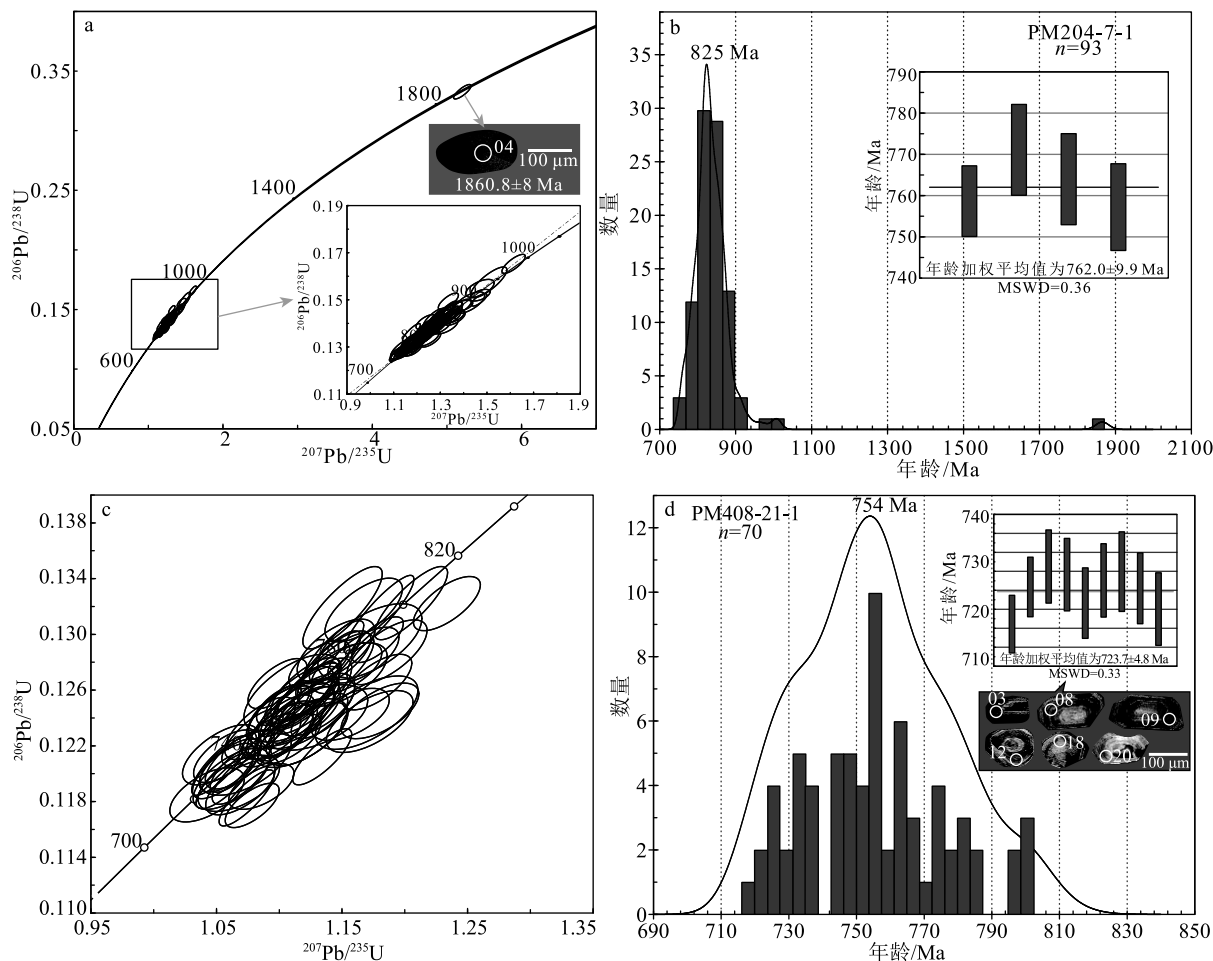


图 6 武当群样品 PM204-7-1(a、b)和 PM408-21-1(c、d)碎屑锆石 U-Pb 年龄谐和图和年龄频率直方图

Fig. 6 U-Pb age concordias and age histograms of detrital zircons from Wudang Group

成的碎屑锆石,是火山岩形成后不久就剥蚀、近距离搬运、沉积的产物,其年龄加权平均值为 723.7 ± 4.8 Ma,可近似代表该套砂岩的沉积时代。其中 5 颗约 800 Ma 的锆石也显示出亲扬子的特征^[22]。

5 讨论

5.1 武当群地层层序

本次研究结果显示,随州地区双台组变质砂岩发育大量 730 Ma 左右的碎屑锆石,最年轻的 9 颗锆石年龄加权平均值为 723.7 ± 4.8 Ma,双台组变质火山凝灰岩锆石年龄加权平均值为 732.9 ± 6.7 Ma。前人在随州地区的年代学资料显示双台组变质酸性火山(凝灰)岩年龄也集中在 720~740 Ma 之间(表 2);而杨坪组 2 个变质砂岩样品最年轻的锆石年龄加权平均值分别为 749 ± 14 Ma 和 762 ± 9.9 Ma,均明显老于双台组,因此可以基本确定,随州地区出露的

武当群应该是杨坪组在下部,双台组在上部的地层序列,这也与武当地区的武当群层序特征一致^[2-3]。

5.2 武当地区和随州地区武当群对比

前人研究表明,武当—随州地区出露的南华系属于一套裂谷环境的双峰式火山—沉积岩组合^[1-2, 6-7, 9, 11-12, 23, 25-28]。通过对比发现,武当和随州 2 个地区的武当群地层时代存在一定的差异:随州地区杨坪组变质砂岩中碎屑锆石最年轻峰值在 750 Ma^[9]左右(表 2),而武当地区杨坪组碎屑锆石最年轻峰值为 780 Ma^[3];随州地区武当群获得的变质火山(凝灰)岩年龄主要集中在 725 Ma 左右,最老年龄为 763 ± 7 Ma^[6],武当地区武当群获得的变质火山(凝灰)岩年龄主要集中在 755 Ma 左右,最老年龄为 777 ± 6 Ma^[29]。通过目前获得的年龄资料对比可以看出,武当地区武当群杨坪组和双台组年龄均较随州地区老约 30 Ma,且具有更长的演化时间(图

7),暗示扬子北缘的南华纪裂谷可能在武当地区较早形成,逐渐向东裂解延伸至随州地区,具有自西向东逐渐打开的“剪刀式”裂解特征。

5.3 武当群与扬子陆块的关系

通过系统搜集前人在武当地区和随州地区的武当群碎屑锆石资料(表2;图1、图8-a),随州地区武当群最年轻的碎屑锆石峰值年龄为759 Ma,武当

地区为722 Ma,结合薄片发育火山岩屑的特征,认为其可能主要为武当群的火山岩再循环形成的碎屑锆石,说明武当群裂解最强烈的时期为722~759 Ma。该时间段大量的火山活动提供的碎屑物质经过再循环,为武当群沉积提供了大量物源,同时,该时期的裂解事件可能是扬子北缘 Rodinia 超大陆裂解过程的体现^[30~31]。

表2 南秦岭随州和武当地区武当群测年数据

Table 2 Zircon U-Pb ages of Wudang Group of Suizhou and Wudang area in South Qinling Orogen

随州地区				武当地区				
地层单位	岩性	年龄/Ma	资料来源	地层单位	岩性	年龄/Ma	资料来源	
双台组	变质砂岩	702±6	⑤	双台组	变质砂岩	755	[3]	
		715±6				726±8	[24]	
		727±8				726±10		
		734±7				668.4±6.2	[8]	
		720±7	677.2±3.9					
		720±5	680.4±4.6					
		722±6	[5]		703.0±7.9	③		
		723.7±4.8	本文		715.0±6.1			
		739±4	[23]		750.6±9.7			
		734±3			771.2±9.7			
		727±5			727.8±5.7			
	742±6	741.5±5.6	[11]					
	变质火山(凝灰)岩	726.0±5.2	④		746±11	变质火山(凝灰)岩	705.0±0.5	[10]
		732.9±6.7	本文		706.7±0.1			
		741±7	[6]		711.1±1.6			
		763±7			715.2±0.7			
		715.6±1.0						
杨坪组	变质砂岩	749±14	本文	716.2±1.1	杨坪组	变质砂岩	749±8	②
		762±9.9		769±33			[4]	
		755±6		752 ± 3			[2]	
		750±5	751 ± 4					
		[9]	755 ± 3					
			[9]	757 ±2				
				769 ± 33				
		755±6						

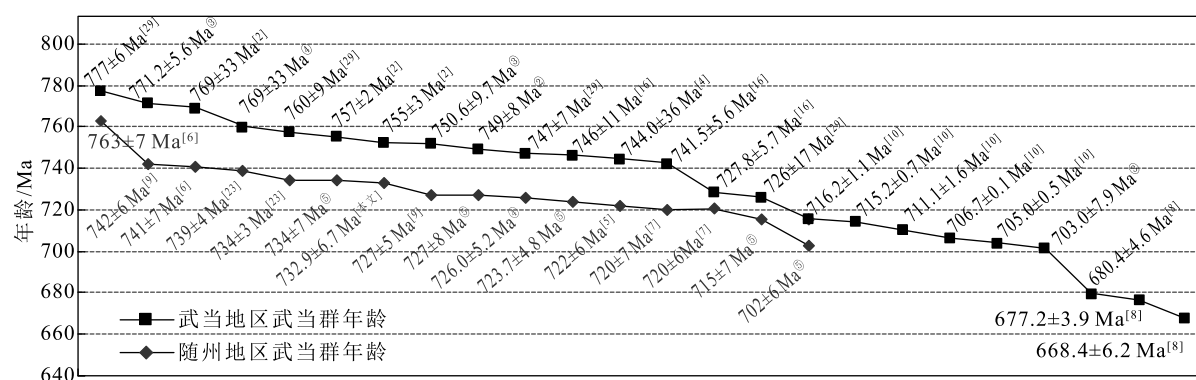


图 7 南秦岭随州—武当地区武当群年龄对比图

Fig. 7 The comparison of zircon U-Pb ages of Wudang Group of Suizhou and Wudang area in South Qinling Orogen

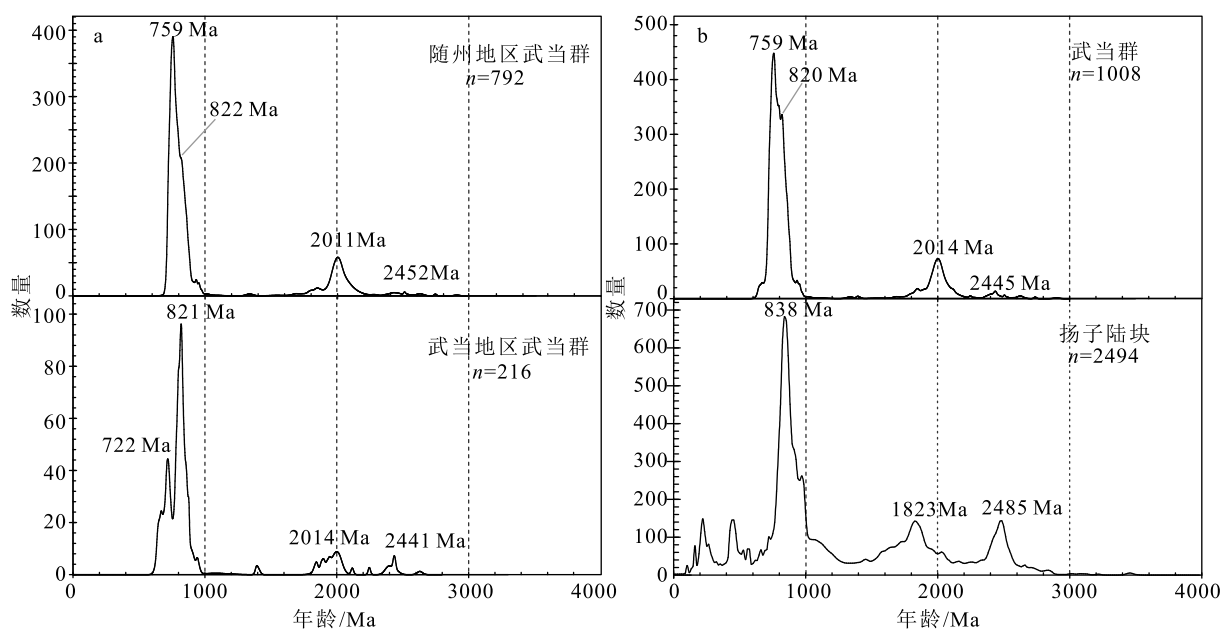


图 8 随州、武当地区武当群碎屑锆石频谱特征对比(a)和武当群与扬子陆块碎屑锆石频谱特征对比(b)

(武当地区数据据参考文献[3,24,29];随州地区数据据参考文献[5,7,9,23];扬子陆块数据据参考文献[32-38])

Fig. 8 Detrital zircons U-Pb ages relative probability diagrams plotted for comparison of Wudang Group from Wudang and Suizhou area (a) and detrital zircons U-Pb ages relative probability diagrams plotted for comparison from Wudang Group and Yangtze Block (b)

与扬子陆块碎屑锆石对比可以看出(表2;图1、图8-b),武当群碎屑锆石的主要峰值年龄为759 Ma、820 Ma、2014 Ma 和 2445 Ma,其中峰值年龄820 Ma 与扬子北缘以大洪山、黄陵地区为代表的新元古代洋陆转换时间对应^[39-44],是扬子陆块的特征峰值^[30];峰值2445 Ma 与扬子陆块碎屑锆石峰值也具有较好的吻合性,显示出武当群强烈的亲扬子属性;峰值2014 Ma 在扬子地区虽有记录^[45-47],但未在扬子陆块碎屑锆石中形成峰值,而南秦岭北部的桐柏—大别地区也发育2.0 Ga左右的岩浆—变质事

件^[47-49],暗示武当群沉积物源亦有来自北部桐柏—大别地区的贡献。

6 结 论

(1)通过对随州地区武当群锆石年代学研究,可以确定武当群的层序为杨坪组变沉积岩在下部,双台组变火山—沉积岩在上部的沉积层序,与武当地区武当群的层序特征一致。

(2)通过系统对比武当、随州地区武当群的锆石年代学资料,发现武当地区武当群年龄较随州

地区老约 30 Ma, 暗示扬子北缘的南华纪裂谷可能于武当地区较早形成, 逐渐向东裂解延伸至随州地区, 具有自西向东逐渐打开的“剪刀式”裂解特征。

(3) 通过系统对比武当、随州地区武当群碎屑锆石与扬子陆块碎屑锆石频谱特征, 认为武当群沉积物源主要来自扬子陆块, 亦有来自北部桐柏—大别地区的物源; 722~759 Ma 为扬子北缘南华纪早期裂解最强烈的时期, 该裂解事件可能是扬子北缘 Rodinia 超大陆裂解过程的体现。

致谢: 湖北省地质调查院陈铁龙高级工程师在野外调查过程中给予了指导与帮助, 湖北省地质实验测试中心潘诗洋协助完成样品测试分析工作, 审稿专家提出了宝贵的意见, 在此一并谨致谢意。

参考文献

- [1] 凌文黎, 程建萍, 王歆华, 等. 武当地区新元古代岩浆岩地球化学特征及其对南秦岭晋宁期区域构造性质的指示[J]. 岩石学报, 2002, 18(1): 25-36.
- [2] 凌文黎, 任邦方, 段瑞春, 等. 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[J]. 科学通报, 2007, (12): 1445-1456.
- [3] 凌文黎, 段瑞春, 柳小明, 等. 南秦岭武当山群碎屑锆石 U-Pb 年代学及其地质意义[J]. 科学通报, 2010, 55(12): 1153-1161.
- [4] 蔡志勇, 罗洪, 熊小林, 等. 武当群上部沉积岩组时代归属问题: 单锆石 U-Pb 年龄的制约[J]. 地层学杂志, 2006, (1): 60-63.
- [5] 李福林, 李益龙, 周国华, 等. 湖北随州大狼山群片岩中碎屑锆石的 U-Pb 年龄及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2010, 29(5): 488-496.
- [6] 薛怀民, 扬子克拉通北缘随(州)—枣(阳)地区新元古代变质岩浆岩的地球化学和 SHRIMP 锆石 U-Pb 年代学研究[J]. 岩石学报, 2011, 27(4): 1116-1130.
- [7] 薛怀民, 马芳, 桐柏山造山带南麓随州群变沉积岩中碎屑锆石的年代学及其地质意义[J]. 岩石学报, 2013, 29(2): 564-580.
- [8] 张永清, 张健, 李怀坤, 等. 南秦岭武当山群变质酸性火山岩锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质学报, 2013, 87(7): 922-930.
- [9] Yang Z N, Yang K G, Xu Y, et al. Zircon U-Pb geochronology, Hf isotopic composition, and geological implications of the Neoproterozoic meta-sedimentary rocks in Suizhou-Zaoyang area, the northern Yangtze Block [J]. Science China - Earth Sciences, 2015, (11): 1910-1923.
- [10] Wang R R, Xu Z Q, M. Santosh, et al. Middle Neoproterozoic (ca. 705-716 Ma) arc to rift transitional magmatism in the northern margin of the Yangtze Block: Constraints from geochemistry, zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes [J]. Journal of Geodynamics, 2017, 109: 59-74.
- [11] 湖北省地质调查院. 中国区域地质志·湖北志[M]. 北京: 地质出版社, 2021.
- [12] 陈公信, 金经纬. 湖北省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
- [13] 李雄伟, 汪国虎. 随南地区武当岩群地层层序[J]. 湖北地矿, 2000, (1): 3-11.
- [14] 王宗和. 鄂西北武当山群的划分与对比[J]. 湖北地质, 1989, 3(1): 17-29.
- [15] 陈晋镛. 武当山群研究进展[J]. 地质科技通报, 1991, 10: 83-84.
- [16] 周高, 康维国, 等. 鄂北蓝片岩带研究[M]. 北京: 地质出版社, 1991.
- [17] 周亮亮, 魏均启, 王芳, 等. LA-ICP-MS 工作参数优化及在锆石 U-Pb 定年分析中的应用[J]. 岩矿测试, 2017, 36(4): 350-359.
- [18] Ludwig K R. User's Manual for ISOPLOT 3.00: A Geochronological Toolkit for Microsoft Excel [M]. Berkeley: Berkeley Geochronology Center Special Publication, 2003.
- [19] Liu Y S, Hu Z C, Gao S, et al. In situ analysis of major and trace elements of anhydrous minerals by LA-ICP-MS without applying an internal standard[J]. Chemical Geology, 2008, 257: 34-43.
- [20] Liu Y S, Gao S, Hu Z C, et al. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-peridotite interactions in the Trans-North China Orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons of mantle xenoliths [J]. Journal of Petrology, 2010, 51: 537-571.
- [21] Liu Y S, Hu Z C, Zong K Q, et al. Reappraisal and refinement of zircon U-Pb isotope and trace element analyses by LA-ICP-MS [J]. Chinese Sci. Bulletin, 2010, 55: 1535-1546.
- [22] 郑永飞, 张少兵. 华南前寒武纪大陆地壳的形成和演化[J]. 科学通报, 2007, 52(1): 1-10.
- [23] Yang Y N, Wang X C, Li Q L, et al. Integrated in situ U-Pb age and Hf-O analyses of zircon from Suixian Group in northern Yangtze: New insights into the Neoproterozoic low- $\delta^{18}\text{O}$ magmas in the South China Block [J]. Precambrian Research, 2016, 273 (2016): 151-164.
- [24] Wang L, Griffin W L, Yu J, et al. U-Pb and Lu-Hf isotopes in detrital zircon from Neoproterozoic sedimentary rocks in the northern Yangtze Block: Implications for Precambrian crustal evolution [J]. Gondwana Research, 2013, 23(4): 1261-1272.
- [25] 罗郦, 李金发. 武当地块耀岭河群中两类不同性质的酸性火山岩研究[J]. 大地构造与成矿学, 2010, 34(1): 125-132.
- [26] 邱啸飞, 江拓, 卢山松. 南秦岭随州地区晚新元古代耀岭河群双峰式火山岩的确认及其地质意义[C]//中国矿物岩石地球化学学会第 17 届学术年会论文摘要集, 2019.
- [27] 李怀坤, 陆松年, 陈志宏, 等. 南秦岭耀岭河群裂谷型火山岩锆石 U-Pb 年代学[J]. 地质通报, 2003, 22(10): 775-781.
- [28] 夏林圻, 夏祖春, 李向民, 等. 南秦岭东段耀岭河群、陨西群、武当山群火山岩和基性岩墙群岩石成因[J]. 西北地质, 2008, (3): 1-29.
- [29] 祝禧艳, 陈福坤, 王伟, 等. 豫西地区秦岭造山带武当群火山岩和沉积岩锆石 U-Pb 年龄[J]. 地球学报, 2008, 29(6): 817-829.
- [30] 吴年文, 江拓, 徐琼, 等. 南秦岭随州地区晚新元古代耀岭河群双峰式火山岩: 对扬子克拉通北缘大陆裂解过程的约束[J]. 地质通报, 2021, 40 (6): 920-929.

- [31] Tollo R P, Aleinikoff J N, Bartholomew M J, et al. Neoproterozoic A-type granitoids of the central and southern Appalachian: Intraplate magmatism associated with episodic rifting of the Rodinia supercontinent[J]. *Precambrian Res.*, 2004, 128: 3-38.
- [32] Xu Y, Du Y, Cawood P A, et al. Detrital zircon provenance of Upper Ordovician and Silurian strata in the northeastern Yangtze Block: Response to orogenesis in South China[J]. *Sedimentary Geology*, 2012, 267: 63-72.
- [33] Yan Y, Hu X, Lin G, et al. Sedimentary provenance of the Hengyang and Mayang basins, SE China, and implications for the Mesozoic topographic change in South China Craton: Evidence from detrital zircon geochronology[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 41 (6): 494-503.
- [34] Yao J, Shu L, Santosh M, et al. Geochronology and Hf isotope of detrital zircons from Precambrian sequences in the eastern Jiangnan Orogen: Constraining the assembly of Yangtze and Cathaysia Blocks in South China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 74: 225-243.
- [35] Li H, Jia D, Wu L, et al. Detrital zircon provenance of the Lower Yangtze foreland basin deposits: constraints on the evolution of the early Palaeozoic Wuyi-Yunkai orogenic belt in South China[J]. *Geological Magazine*, 2013, 150(6): 959-974.
- [36] Duan L, Meng Q, Wu G, et al. Detrital zircon evidence for the linkage of the South China block with Gondwanaland in early Palaeozoic time[J]. *Geological Magazine*, 2012, 149(6): 1124-1131.
- [37] She Z, Ma C, Wan Y, et al. An Early Mesozoic transcontinental palaeoriver in South China: evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and Hf isotopes[J]. *Journal of the Geological Society*, 2012, 169(3): 353-362.
- [38] Wang W, Zhou M, Yan D, et al. Depositional age, provenance, and tectonic setting of the Neoproterozoic Sibao Group, southeastern Yangtze Block, South China[J]. *Precambrian Research*, 2012, 192: 107-124.
- [39] 彭松柏, 李昌年, M Kusky Timothy, 等. 鄂西黄陵背斜南部元古宙庙湾蛇绿岩的发现及其构造意义[J]. *地质通报*, 2010, 29(1): 8-20.
- [40] 胡正祥, 陈超, 毛新武, 等. 鄂北大洪山晋宁期岛弧火山岩和增生杂岩的厘定及地质意义[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(6): 757-766.
- [41] 胡正祥, 陈超, 毛新武, 等. 扬子北缘青白口系土门岩组岛弧火山-碎屑岩的定义及意义[J]. *地层学杂志*, 2017, 41(3): 304-317.
- [42] 谢纪海, 胡正祥, 毛新武, 等. 鄂北大洪山晋宁期 MORB-like 玄武岩的识别与洋内俯冲作用[J]. *中国地质*, 2019, 46(6): 1496-1511.
- [43] Peng S, Kusky T M, Jiang X F, et al. Geology, geochemistry, and geochronology of the Miaowan ophiolite, Yangtze craton: Implications for South China's amalgamation history with the Rodinian supercontinent[J]. *Gondwana Research*, 2012, 21(2/3): 577-594.
- [44] Xu Y, Yang K G, Ali Polat, et al. The ~860 Ma mafic dikes and granitoids from the northern margin of the Yangtze Block, China: A record of oceanic subduction in the early Neoproterozoic[J]. *Precambrian Research*, 2016, 275: 310-331.
- [45] Han Q S, Peng S B, Kusky Timothy, et al. A Paleoproterozoic ophiolitic mélange, Yangtze craton, South China: Evidence for Paleoproterozoic suturing and microcontinent amalgamation[J]. *Precambrian Research*, 2017, 293: 13-38.
- [46] Han Q S, Peng S B, Polat Ali, et al. A ca. 2.1 Ga Andean-type margin built on metasomatized lithosphere in the northern Yangtze craton, China: Evidence from high-Mg basalts and andesites[J]. *Precambrian Research*, 2018, 309: 309-324.
- [47] 吴元保, 陈道公, 夏群科, 等. 大别山黄土岭麻粒岩锆石和共生矿物的微量元素分析及其地质意义[J]. *地球化学*, 2004, 33(4): 334-342.
- [48] 陈能松, 刘嵘, 孙敏, 等. 北大别黄土岭长英质麻粒岩的原岩、变质作用及源区热事件年龄的锆石 LA-ICPMS U-Pb 测年约束[J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2006, 31(3): 294-300.
- [49] 郭盼, 陈超, 吴波, 等. 西大别~2.0Ga 变质花岗岩的发现及其 Hf 同位素特征[J]. *中国地质*, 2021, 48(4): 1267-1279.
- ① 湖北地质矿产开发局. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:5 万安居镇幅、随州市幅、均川幅. 1999.
- ② 湖北省地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:25 万十堰市幅、襄樊市幅. 2008.
- ③ 湖北省地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:5 万水坪幅、竹山县幅、蔡家坝幅、峪口幅. 2016.
- ④ 湖北省地质调查院. 中华人民共和国区域地质调查报告 1:5 万长岗店幅、均川幅、客店坡幅、古城堰幅、三阳店幅. 2019.
- ⑤ 赵军红. 南秦岭武当群火山-沉积岩地球化学及地质意义. 中国地质大学(武汉), 2018.