

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

凌文黎 任邦方 段瑞春 柳小明 毛新武 彭练红
刘早学 程建萍 杨红梅

(中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉 430074; 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室, 武汉 430074;
西北大学大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069; 湖北省地质调查院, 武汉 430022. E-mail: wlling@cug.edu.cn)

摘要 武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群是南秦岭出露规模最大的前寒武纪地质单元组合, 对采自武当山群的 5 件火山-火山碎屑岩、2 件耀岭河群火山岩和 1 件基性侵入岩体样品进行了锆石原位 LA-ICP-MS(激光剥蚀等离子体质谱)方法 U-Pb 同位素定年. 结果表明, 武当山群的形成时代为(755±3) Ma (5 件样品年龄值的加权平均值, MSWD=0.47, 95%置信度, 下同), 而耀岭河群火山岩和基性侵入岩群分别为(685±5) Ma(两件样品年龄值加权平均值, MSWD=0.36)和(679±3) Ma(MSWD=1.6)的年龄在误差范围内相同. 所获年龄均明显小于早期多数文献的报道值, 武当山群和耀岭河群火山-沉积岩地层的时代分别对应于峡东剖面的莲沱组和略早于南沱组. 岩浆岩中捕获锆石显示, 南秦岭武当地区存在与扬子克拉通内部和陆缘区时代相同的 830~780 Ma 岩浆事件记录, 指示了区域内存在晋宁期基底岩系或来自扬子克拉通北缘晋宁期物源区沉积物, 表明新元古代时期南秦岭武当地区是现今扬子克拉通北缘的组成部分.

关键词 武当山群 耀岭河群 基性侵入岩群 锆石U-Pb定年 扬子克拉通北缘

秦岭-大别-苏鲁造山带为扬子与华北陆块的拼合部位^[1]. 大别-苏鲁造山带榴辉岩相变质岩系对大陆陆块深俯冲与折返过程的指示, 引起了地学家对其大陆动力学意义的高度重视. 在大别-苏鲁造山带大陆深俯冲与折返动力学过程的研究中, 将扬子陆块作为发生过深俯冲作用的陆块进行识别的一个重要标志是变质原岩中晋宁期岩浆锆石的年代学记录^[2-4]. 值得指出, 将晋宁期岩浆事件作为判别来自扬子陆块原岩的标志, 主要依据了扬子克拉通陆核或陆缘区的新元古代构造-岩浆事件记录, 但是南秦岭是否属于新元古代扬子克拉通陆缘区, 目前已有的研究积累并不能明确这一点.

秦岭与大别造山带被南阳盆地所分隔, 两造山带在变质程度上存在显著差异. 因此, 要了解发生高压-超高压变质前俯冲陆块原岩的性质, 秦岭造山带是理想的研究地区. 南秦岭是组成秦岭造山带的重要构造单元, 被认为是代表了扬子克拉通北缘卷入造山带的部分^[5]. 武当山群、侵入其内的基性岩群和耀岭河群是南秦岭内部出露规模最大的前寒武纪火

山-沉积岩地层或岩浆岩单元. 由于它们均与震旦纪地层直接接触, 受到了形成于元古宙晚期的地质接触关系约束. 因此, 充分了解南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群的形成时代和构造背景, 对认识南秦岭早期地质演化历史及其与扬子克拉通的相互关系, 乃至扬子克拉通周边新元古代岩浆作用与 Rodinia 超大陆裂解过程的关系具有重要的科学意义.

本文报道了南秦岭武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群系统的锆石 U-Pb 同位素年代学研究结果, 对它们的形成时代重新进行了厘定, 并对其所揭示的地质意义进行了讨论.

1 区域地质概况

南秦岭武当山群主要分布于鄂西北陨西—十堰—丹江口至竹山—房县一带的广泛区域, 出露面积约 8000 km²(图 1). 武当山群地层为绿片岩相变火山-沉积岩系组合, 分别由杨坪组变沉积岩和双台组变火山-沉积岩组成. 变沉积岩原岩岩性以长石石英质砂岩为主, 夹粉砂质泥岩和泥质粉砂岩, 而变火山岩岩性

2007-02-26 收稿, 2007-04-19 接受

国家自然科学基金(批准号: 40373015, 40173016, 40472099)、国家自然科学基金创新研究群体科学基金(批准号: 40521001)和中国地质大学创新团队资助项目

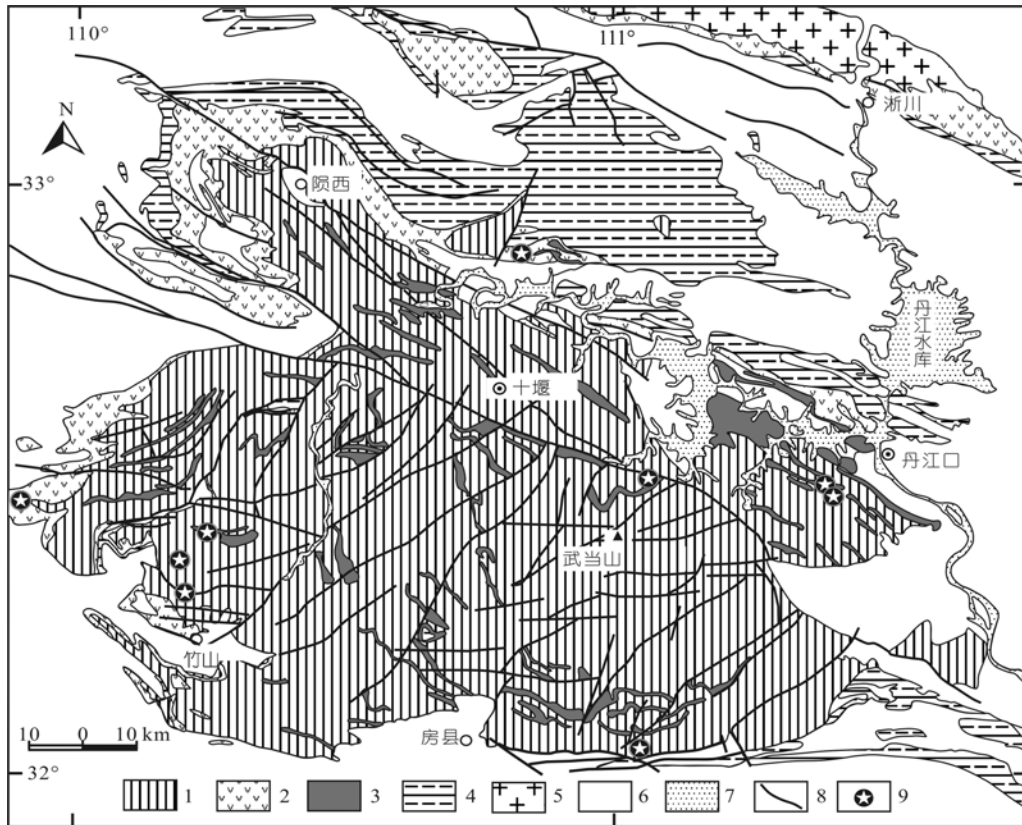


图1 南秦岭武当地区区域地质略图

1. 武当山群; 2. 耀岭河群; 3. 基性岩墙; 4. 震旦系; 5. 中-酸性侵入岩; 6. 显生宇; 7. 水库; 8. 断裂; 9. 采样点

以中酸性为主、基性岩类次之。中酸性岩原岩主要为英安一流纹质岩和中酸性(晶屑、岩屑)凝灰岩,基性岩原岩主要为玄武-安山质熔岩、火山碎屑岩或凝灰岩。耀岭河群分布于武当隆起区周缘,主要出露于区内北部陨西—陨县和西部德胜铺—竹溪县等地。耀岭河群与武当群之间的接触关系存在韧性剪切带或整合接触两种不同认识。与武当山群类似,耀岭河群地层具绿片岩相变质,但岩性以变玄武质火山岩(熔岩、火山碎屑岩或凝灰岩)为主,夹少量变酸性火山岩和变泥质岩。原岩为辉长-辉绿岩的基性岩群呈近顺层或岩墙产状侵入武当山群和耀岭河群。侵入岩群个体规模变化较大,出露宽度多为数百米至小于1 m不等,具绿片岩相变质。由于后期强烈的变形作用,它们与围岩间的接触界线多呈不规则状,并与围岩具相同的片理产状。武当山群、耀岭河群及基性侵入岩群受震旦系陡山沱组和灯影组覆盖。

2 样品与分析方法

由于武当山群岩系的区域出露面积较大,且前

人曾提出区域南、北部武当山群火山岩可能形成于不同时代^[6],为保证样品的代表性,分别对出露于区域东部丹江口新河镇、北部武当山镇八仙观、西部竹山县三台-南口和南部房县榔口附近的武当山群双台组火山岩—火山碎屑岩进行了5件锆石样品的采集(图1),并对区域北部陨县桂花乡、西部竹山县德胜铺耀岭河群火山岩进行了2件年代学样品采集。采集的2件基性侵入岩样品位于竹山县南口和丹江口新河镇附近,但因后者仅分离出了2粒锆石,且其U-Pb同位素组成不谐和(²⁰⁶Pb/²³⁸U表面年龄分别为(680 ± 7)和(768 ± 6) Ma),本文将不对此样进行正式报道。

用于分选锆石的大样野外采集重量为20~60 kg,在室内经无污染碎样后用淘盘进行重矿物富集,然后在双目显微镜下进行人工挑纯。对选好的锆石晶体先进行阴极发光照像,以作为原位U-Pb同位素测量时位置选择的依据。锆石U-Pb同位素组成分析在西北大学大陆动力学国家重点实验室完成,采用激光剥蚀(LA)-等离子体质谱(ICP-MS)进行测量。分析

采用的 ICP-MS 为美国 Agilent 公司生产的 Agilent7500a, 而 LA 系统为德国 MicroLas 公司生产的 GeoLas200M, 系统中组装了德国 Lambda Physik 公司的 ComPex102 ArF 准分子激光器(波长 193 nm)和 MicroLas 公司的光学系统. 锆石 U-Pb 同位素组成分析采用 91500 国际标准锆石作为外标, 采用 NIST SRM610 作为元素含量测定外标, ²⁹Si 作为内标元素, 剥蚀激光束直径 30 μm. 详细的仪器参数与分析流程参见文献[7,8]. 样品的同位素比值及元素含量采用 GLITTER(Ver 4. 0, Macyuarie University)程序计算, U-Pb 同位素年龄计算应用 Isoplot (ver2.49)软件完成.

3 锆石 U-Pb 同位素分析结果

武当山群和耀岭河群样品为与变玄武质火山岩互层或玄武质火山岩夹层中的变流纹质火山熔岩或晶屑岩屑凝灰质火山碎屑岩岩层. 变流纹质火山岩

(WD05-50, WD06-06, WD05-34 和 WD06-04)具有明显的火山流纹构造和隐晶质结构, 主要造岩矿物为斜长石(25%~60%)、石英(30%~40%)、钾长石(7%~ 30%)和少量磁铁矿(<0.6%), 其 SiO₂ 含量分别为 75.37%, 77.55%, 77.04%和 77.72%(质量分数, 下同), 相应的 ε_{Nd}(750 Ma)分别为 +6.01, +3.82, +0.71 和 +2.00(本文作者未发表数据, 下同). 晶屑岩屑凝灰质火山碎屑岩(WD06-02, WD06-07 和 WD06-09)含 30%~5%不等的晶屑和岩屑, 主要矿物为石英和长石, 大小为 2~0.5 mm, 胶结物为隐晶质, 主要矿物组成为斜长石 40%~65%、石英 25%~35%, 钾长石为 4.5%~20%, 含 1%~3%以磁铁矿为主的不透明矿物, 其 SiO₂ 含量分别为 72.18%, 73.85%和 73.45%, 相应的 ε_{Nd}(750 Ma)分别为 -7.12, -0.27 和 -0.43. 基性侵入岩群样品为变辉长岩, 具变余辉长结构(SiO₂ = 47.20%, ε_{Nd} = +3.75). 8 件样品的锆石 U-Pb 同位素组成列于表 1.

表 1 武当山群、耀岭河群火山岩及基性侵入岩锆石 U-Pb 同位素组成

样号及 分析号	测量比值					表面年龄/Ma		
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ± 1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ± 1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th ± 1σ	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb ± 1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U ± 1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U ± 1σ
WD05-50								
1	0.0647±0.0007	1.101±0.009	0.1235±0.0008	0.0394±0.0002	1.38	764±24	751±5	754±5
2	0.0644±0.0026	1.102±0.043	0.1241±0.0015	0.0408±0.0009	0.65	755±83	754±8	754±21
3	0.0665±0.0039	0.995±0.056	0.1085±0.0018	0.0398±0.0010	0.82	822±117	664±10	701±29
4	0.0668±0.0040	1.088±0.063	0.1181±0.0020	0.0446±0.0014	0.55	831±120	720±11	747±31
7	0.0657±0.0041	1.109±0.068	0.1225±0.0022	0.0418±0.0012	0.82	796±127	745±12	758±33
8	0.0656±0.0040	1.122±0.067	0.1241±0.0020	0.0421±0.0014	0.64	793±124	754±12	764±32
10	0.0680±0.0027	1.131±0.043	0.1206±0.0015	0.0401±0.0008	0.95	868±80	734±9	768±21
11	0.0639±0.0010	1.102±0.015	0.1251±0.0009	0.0382±0.0003	0.86	738±32	760±5	754±7
13	0.0653±0.0042	1.118±0.071	0.1242±0.0022	0.0394±0.0012	0.95	783±131	755±13	762±34
15	0.0671±0.0032	1.128±0.051	0.1219±0.0017	0.0396±0.0009	1.16	840±95	742±10	767±24
16	0.0655±0.0009	1.032±0.011	0.1144±0.0008	0.0374±0.0002	1.78	789±27	698±5	720±5
17	0.0662±0.0028	1.134±0.047	0.1242±0.0016	0.0426±0.0010	0.66	813±86	755±9	770±22
20	0.0652±0.0008	1.114±0.010	0.1240±0.0008	0.0401±0.0003	1.40	780±25	754±5	760±5
21	0.0640±0.0007	1.104±0.009	0.1252±0.0008	0.0404±0.0002	1.56	740±23	760±5	755±4
24	0.0683±0.0035	1.120±0.056	0.1189±0.0019	0.0398±0.0009	1.18	878±103	724±11	763±27
26	0.0646±0.0033	1.121±0.055	0.1258±0.0019	0.0429±0.0012	0.64	762±103	764±11	764±26
29	0.0655±0.0042	1.115±0.070	0.1235±0.0022	0.0474±0.0016	0.62	789±130	751±13	760±34
30	0.0649±0.0009	1.107±0.013	0.1237±0.0009	0.0403±0.0003	1.66	771±30	752±5	757±6
31	0.0634±0.0008	1.113±0.011	0.1274±0.0009	0.0427±0.0003	1.21	720±26	773±5	760±5
32	0.0646±0.0049	1.110±0.083	0.1248±0.0025	0.0499±0.0021	0.56	760±153	758±14	758±40
33	0.0658±0.0035	1.115±0.058	0.1229±0.0019	0.0449±0.0012	0.74	800±108	748±11	761±28
34	0.0669±0.0040	1.123±0.065	0.1217±0.0021	0.0376±0.0010	1.34	836±120	740±12	765±31
36	0.0657±0.0032	1.126±0.054	0.1243±0.0018	0.0455±0.0013	0.62	797±100	755±10	766±26
38	0.0648±0.0039	1.119±0.066	0.1252±0.0021	0.0402±0.0014	0.60	769±123	760±12	762±32
39	0.0631±0.0012	1.076±0.019	0.1238±0.0010	0.0411±0.0004	1.05	711±41	752±6	742±9
41	0.0635±0.0011	1.090±0.017	0.1245±0.0009	0.0391±0.0003	1.58	724±36	756±5	748±8
42	0.0639±0.0035	1.103±0.059	0.1253±0.0020	0.0426±0.0011	0.83	738±113	761±11	755±29
43	0.0663±0.0007	1.120±0.009	0.1225±0.0008	0.0403±0.0002	1.48	817±23	745±5	763±4
44	0.0664±0.0034	1.119±0.056	0.1222±0.0018	0.0428±0.0011	0.76	819±104	743±11	762±27
45	0.0645±0.0008	1.106±0.012	0.1244±0.0009	0.0413±0.0003	1.33	758±27	756±5	756±6

表 1(续)

样号及 分析号	测量比值					表面年龄/Ma		
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$
47	0.0643±0.0008	1.104±0.010	0.1244±0.0008	0.0417±0.0003	1.29	752±25	756±5	755±5
48	0.0628±0.0033	1.111±0.057	0.1283±0.0019	0.0454±0.0012	0.69	701±108	778±11	759±27
49	0.0631±0.0031	1.086±0.051	0.1248±0.0018	0.0431±0.0012	0.61	712±100	758±10	747±25
51	0.0658±0.0036	1.049±0.056	0.1157±0.0017	0.0393±0.0011	0.82	799±111	706±10	728±28
52	0.0669±0.0023	1.036±0.034	0.1123±0.0013	0.0402±0.0007	0.83	836±71	686±7	722±17
53	0.0656±0.0056	1.069±0.089	0.1182±0.0029	0.0493±0.0021	0.65	793±170	720±16	738±44
54	0.0684±0.0030	1.190±0.050	0.1263±0.0017	0.0408±0.0008	1.08	879±88	767±10	796±23
55	0.0667±0.0011	1.047±0.014	0.1138±0.0008	0.0374±0.0003	1.39	829±33	695±5	727±7
56	0.0655±0.0021	1.112±0.035	0.1231±0.0013	0.0401±0.0006	1.15	791±67	748±8	759±17
58	0.0661±0.0020	1.108±0.031	0.1215±0.0012	0.0397±0.0005	1.14	810±61	739±7	757±15
59	0.0651±0.0037	1.116±0.062	0.1244±0.0021	0.0427±0.0014	0.63	776±116	756±12	761±30
60	0.0665±0.0039	1.039±0.059	0.1133±0.0019	0.0392±0.0012	0.77	823±118	692±11	724±29
WD06-02								
1	0.0673±0.0009	1.280±0.014	0.1380±0.0010	0.0441±0.0004	0.65	845±28	833±5	837±6
3	0.0660±0.0012	1.137±0.017	0.1248±0.0009	0.0366±0.0003	0.85	807±36	758±5	771±8
4	0.0673±0.0013	1.111±0.019	0.1198±0.0009	0.0369±0.0005	0.54	846±38	729±5	759±9
5	0.0642±0.0009	1.095±0.013	0.1237±0.0009	0.0387±0.0003	0.76	748±30	752±5	751±6
6	0.0654±0.0010	1.105±0.014	0.1225±0.0009	0.0379±0.0003	1.01	788±31	745±5	756±7
7	0.0669±0.0026	1.253±0.046	0.1358±0.0017	0.0408±0.0010	0.74	835±78	821±10	825±21
8	0.0651±0.0022	1.110±0.036	0.1237±0.0014	0.0413±0.0008	0.81	777±70	752±8	758±17
10	0.0665±0.0010	1.147±0.015	0.1251±0.0009	0.0388±0.0003	0.87	823±32	760±5	776±7
11	0.0644±0.0010	1.114±0.015	0.1255±0.0009	0.0392±0.0003	0.68	756±32	762±5	760±7
12	0.0657±0.0010	1.143±0.014	0.1261±0.0009	0.0391±0.0003	0.83	798±31	766±5	774±7
13	0.0671±0.0026	1.269±0.047	0.1372±0.0017	0.0482±0.0011	0.74	841±78	829±10	832±21
16	0.0675±0.0012	1.239±0.020	0.1331±0.0010	0.0418±0.0005	0.66	854±37	805±6	818±9
17	0.0646±0.0010	1.104±0.015	0.1240±0.0009	0.0389±0.0004	0.65	761±34	754±5	755±7
18	0.0671±0.0012	1.117±0.018	0.1207±0.0009	0.0385±0.0004	0.71	842±37	735±5	762±9
20	0.0690±0.0011	1.224±0.017	0.1286±0.0009	0.0391±0.0003	0.88	900±33	780±5	812±8
21	0.0652±0.0012	1.119±0.018	0.1245±0.0009	0.0383±0.0004	0.82	779±37	757±5	762±8
22	0.0643±0.0011	1.104±0.017	0.1245±0.0009	0.0391±0.0004	0.82	751±37	757±5	755±8
23	0.0663±0.0009	1.132±0.011	0.1239±0.0008	0.0384±0.0003	0.82	814±27	753±5	769±5
24	0.0679±0.0016	0.997±0.021	0.1065±0.0009	0.0367±0.0005	0.84	866±47	653±5	703±11
25	0.0663±0.0010	1.071±0.014	0.1172±0.0008	0.0364±0.0003	1.03	816±32	714±5	739±7
28	0.0656±0.0009	1.119±0.012	0.1237±0.0008	0.0354±0.0003	0.71	794±27	752±5	762±6
29	0.0689±0.0025	0.945±0.032	0.0996±0.0012	0.0349±0.0008	0.44	894±73	612±7	676±17
30	0.0651±0.0015	1.130±0.023	0.1259±0.0011	0.0403±0.0007	0.40	779±46	764±6	768±11
33	0.0652±0.0010	1.124±0.014	0.1252±0.0009	0.0401±0.0004	0.56	779±31	760±5	765±7
34	0.0647±0.0010	1.120±0.014	0.1255±0.0009	0.0400±0.0003	0.77	766±32	762±5	763±7
35	0.0667±0.0010	1.129±0.013	0.1227±0.0009	0.0396±0.0003	0.65	829±30	746±5	767±6
36	0.0663±0.0010	1.152±0.015	0.1261±0.0009	0.0402±0.0004	0.62	815±32	766±5	778±7
38	0.0682±0.0014	0.976±0.018	0.1037±0.0008	0.0325±0.0004	1.18	876±42	636±5	692±9
39	0.0673±0.0012	1.245±0.019	0.1341±0.0010	0.0432±0.0004	0.63	848±36	811±6	821±9
42	0.0665±0.0011	1.141±0.015	0.1245±0.0009	0.0400±0.0004	0.44	821±33	756±5	773±7
43	0.0687±0.0009	1.215±0.014	0.1283±0.0009	0.0390±0.0003	0.58	889±28	778±5	808±6
44	0.0676±0.0012	1.164±0.019	0.1249±0.0010	0.0418±0.0004	0.80	857±37	758±5	784±9
45	0.0647±0.0010	1.109±0.015	0.1243±0.0009	0.0392±0.0004	0.55	765±34	755±5	758±7
46	0.0653±0.0009	1.119±0.013	0.1242±0.0009	0.0411±0.0003	0.70	785±30	755±5	763±6
47	0.0668±0.0012	1.251±0.020	0.1359±0.0010	0.0415±0.0004	0.96	830±37	821±6	824±9
48	0.0665±0.0011	1.100±0.016	0.1200±0.0009	0.0372±0.0003	0.82	822±34	730±5	753±8
49	0.0650±0.0009	1.118±0.014	0.1248±0.0009	0.0392±0.0003	0.85	775±30	758±5	762±6
50	0.0656±0.0013	1.127±0.020	0.1245±0.0010	0.0410±0.0005	0.74	795±41	757±6	766±10
51	0.0667±0.0018	1.218±0.031	0.1325±0.0013	0.0427±0.0009	0.56	829±56	802±7	809±14

表 1(续)

样号及 分析号	测量比值					表面年龄/Ma		
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$
WD06-06								
1	0.0651±0.0010	1.109±0.015	0.1236±0.0009	0.0365±0.0003	0.72	777±33	752±5	758±7
2	0.0641±0.0009	1.097±0.013	0.1242±0.0009	0.0414±0.0004	0.61	744±30	755±5	752±7
3	0.0647±0.0014	1.107±0.022	0.1242±0.0010	0.0422±0.0005	0.62	763±45	755±6	757±11
4	0.0663±0.0035	1.215±0.062	0.1330±0.0020	0.0457±0.0010	1.13	814±107	805±12	808±29
5	0.0655±0.0019	1.114±0.030	0.1234±0.0012	0.0396±0.0006	0.82	789±59	750±7	760±15
6	0.0644±0.0014	1.101±0.023	0.1242±0.0010	0.0410±0.0004	1.51	753±46	754±6	754±11
7	0.0641±0.0013	1.100±0.019	0.1246±0.0010	0.0431±0.0006	0.45	743±41	757±6	754±9
8	0.0647±0.0014	1.105±0.022	0.1239±0.0010	0.0433±0.0006	0.50	764±44	753±6	756±10
9	0.0654±0.0014	1.110±0.021	0.1231±0.0010	0.0446±0.0006	0.44	787±44	749±6	758±10
10	0.0634±0.0009	0.836±0.010	0.0956±0.0007	0.0303±0.0002	0.70	722±29	589±4	617±5
11	0.0645±0.0009	0.955±0.010	0.1074±0.0007	0.0346±0.0002	1.49	758±28	658±4	681±5
12	0.0645±0.0018	1.095±0.029	0.1231±0.0012	0.0415±0.0006	0.81	758±59	749±7	751±14
13	0.0637±0.0009	1.094±0.013	0.1245±0.0009	0.0416±0.0003	0.69	733±30	757±5	751±6
14	0.0649±0.0010	1.025±0.014	0.1146±0.0008	0.0386±0.0003	0.76	772±32	699±5	717±7
15	0.0647±0.0015	1.105±0.023	0.1239±0.0011	0.0413±0.0006	0.52	763±48	753±6	756±11
16	0.0658±0.0020	1.121±0.033	0.1235±0.0013	0.0435±0.0008	0.62	801±63	751±7	763±16
17	0.0670±0.0025	1.131±0.040	0.1224±0.0014	0.0471±0.0011	0.48	839±75	744±8	768±19
19	0.0661±0.0012	1.119±0.019	0.1228±0.0010	0.0419±0.0004	0.71	810±39	747±5	762±9
20	0.0647±0.0021	0.970±0.030	0.1087±0.0011	0.0371±0.0006	0.84	765±68	665±7	688±16
21	0.0638±0.0015	0.956±0.021	0.1086±0.0009	0.0366±0.0004	0.85	737±50	665±5	681±11
23	0.0664±0.0023	1.231±0.040	0.1344±0.0015	0.0496±0.0008	0.99	819±70	813±8	815±18
24	0.0657±0.0023	1.106±0.037	0.1222±0.0014	0.0431±0.0008	0.72	796±72	743±8	756±18
25	0.0653±0.0024	1.118±0.040	0.1241±0.0014	0.0396±0.0009	0.62	785±76	754±8	762±19
26	0.0647±0.0012	1.103±0.017	0.1237±0.0009	0.0388±0.0005	0.48	764±37	752±5	755±8
27	0.0641±0.0012	1.093±0.019	0.1237±0.0010	0.0421±0.0005	0.64	745±40	752±6	750±9
WD06-07								
5	0.0678±0.0039	0.880±0.049	0.0941±0.0016	0.0298±0.0007	1.10	863±116	580±9	641±27
7	0.0665±0.0015	1.009±0.021	0.1102±0.0009	0.0320±0.0004	0.57	821±46	674±5	709±10
8	0.0672±0.0021	0.944±0.027	0.1019±0.0010	0.0314±0.0006	0.53	845±62	625±6	675±14
9	0.0687±0.0042	0.837±0.049	0.0883±0.0015	0.0351±0.0012	0.59	891±120	546±9	618±27
11	0.0687±0.0019	0.883±0.022	0.0932±0.0009	0.0284±0.0004	0.95	891±55	575±5	643±12
13	0.0661±0.0016	0.982±0.021	0.1077±0.0009	0.0335±0.0004	0.83	810±48	660±5	695±11
14	0.0689±0.0017	0.895±0.021	0.0942±0.0008	0.0276±0.0004	0.61	895±50	580±5	649±11
15	0.0694±0.0044	0.847±0.052	0.0885±0.0016	0.0279±0.0007	1.23	911±125	547±10	623±29
16	0.0692±0.0024	0.931±0.030	0.0976±0.0011	0.0313±0.0007	0.53	904±68	600±6	668±16
17	0.0672±0.0012	0.972±0.016	0.1049±0.0008	0.0311±0.0003	1.04	844±38	643±5	689±8
18	0.0673±0.0018	0.831±0.021	0.0896±0.0008	0.0335±0.0005	0.50	848±55	553±5	614±12
19	0.0660±0.0012	1.038±0.017	0.1140±0.0009	0.0339±0.0004	0.60	808±37	696±5	723±8
20	0.0674±0.0017	0.902±0.021	0.0972±0.0009	0.0269±0.0003	1.60	849±52	598±5	653±11
21	0.0673±0.0016	0.930±0.020	0.1002±0.0009	0.0279±0.0004	0.76	848±49	615±5	668±11
22	0.0676±0.0011	0.949±0.013	0.1018±0.0007	0.0292±0.0003	0.66	857±33	625±4	678±7
24	0.0672±0.0024	0.902±0.031	0.0973±0.0011	0.0308±0.0007	0.52	845±74	598±7	653±17
25	0.0694±0.0015	0.824±0.016	0.0861±0.0007	0.0210±0.0002	1.64	911±44	533±4	611±9
26	0.0689±0.0022	0.879±0.026	0.0925±0.0010	0.0274±0.0005	0.74	895±63	570±6	640±14
27	0.0687±0.0014	0.888±0.016	0.0938±0.0007	0.0288±0.0002	2.74	889±41	578±4	645±9
28	0.0702±0.0012	0.838±0.013	0.0866±0.0006	0.0245±0.0002	0.95	934±35	536±4	618±7
29	0.0691±0.0023	0.934±0.029	0.0980±0.0011	0.0328±0.0006	0.66	903±66	603±6	670±15
30	0.0690±0.0010	0.895±0.010	0.0941±0.0006	0.0277±0.0002	0.76	898±29	580±4	649±6
WD06-09								
2	0.0696±0.0020	1.025±0.027	0.1067±0.0010	0.0346±0.0006	0.63	918±57	654±6	716±14
3	0.0670±0.0016	1.065±0.024	0.1153±0.0010	0.0370±0.0005	0.78	837±49	703±6	736±12
4	0.0644±0.0014	1.104±0.022	0.1243±0.0010	0.0382±0.0005	0.62	756±45	755±6	755±10

表1(续)

样号及 分析号	测量比值					表面年龄/Ma		
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$
5	0.0675±0.0011	1.054±0.015	0.1132±0.0008	0.0353±0.0003	0.86	854±33	691±5	731±7
6	0.0667±0.0024	1.079±0.038	0.1174±0.0014	0.0352±0.0008	1.03	829±74	715±8	743±18
8	0.0666±0.0011	1.073±0.016	0.1167±0.0009	0.0379±0.0003	1.11	826±35	712±5	740±8
9	0.0667±0.0010	1.080±0.014	0.1174±0.0009	0.0358±0.0004	0.49	830±32	716±5	744±7
10	0.0669±0.0019	1.076±0.028	0.1167±0.0011	0.0353±0.0006	0.66	835±57	711±6	742±14
11	0.0696±0.0016	0.995±0.020	0.1037±0.0009	0.0327±0.0003	1.36	916±45	636±5	701±10
12	0.0668±0.0017	1.078±0.025	0.1171±0.0011	0.0375±0.0004	1.32	831±51	714±6	743±12
13	0.0691±0.0019	1.018±0.027	0.1069±0.0010	0.0331±0.0005	1.05	901±56	655±6	713±13
15	0.0646±0.0016	1.095±0.025	0.1231±0.0011	0.0395±0.0004	1.06	760±50	748±6	751±12
16	0.0642±0.0013	1.093±0.020	0.1236±0.0009	0.0396±0.0003	1.20	748±42	751±5	750±10
17	0.0658±0.0018	1.090±0.029	0.1202±0.0012	0.0382±0.0005	1.03	799±57	732±7	748±14
18	0.0662±0.0014	1.078±0.020	0.1180±0.0010	0.0375±0.0004	1.17	813±42	719±6	742±10
21	0.0722±0.0010	0.947±0.011	0.0952±0.0007	0.0391±0.0003	1.18	991±28	586±4	677±6
22	0.0678±0.0012	1.060±0.016	0.1134±0.0009	0.0380±0.0003	0.93	862±35	692±5	734±8
24	0.0683±0.0014	1.298±0.023	0.1379±0.0011	0.0431±0.0005	0.62	877±41	833±6	845±10
26	0.0638±0.0017	1.107±0.027	0.1258±0.0012	0.0384±0.0005	1.19	735±55	764±7	757±13
27	0.0680±0.0017	1.040±0.024	0.1108±0.0010	0.0359±0.0006	0.53	870±51	678±6	724±12
28	0.0644±0.0019	1.107±0.031	0.1247±0.0012	0.0369±0.0004	1.86	753±61	758±7	757±15
29	0.0642±0.0014	1.097±0.021	0.1239±0.0010	0.0361±0.0003	1.36	749±44	753±6	752±10
35	0.0665±0.0023	0.909±0.030	0.0991±0.0011	0.0321±0.0006	0.79	823±71	609±6	657±16
36	0.0665±0.0018	1.058±0.027	0.1154±0.0011	0.0370±0.0005	0.76	824±56	704±6	733±13
37	0.0661±0.0019	1.070±0.030	0.1175±0.0012	0.0370±0.0006	0.71	809±60	716±7	739±15
38	0.0648±0.0012	1.063±0.017	0.1190±0.0009	0.0367±0.0003	1.27	767±38	725±5	735±9
39	0.0643±0.0022	1.094±0.036	0.1234±0.0014	0.0396±0.0007	0.96	752±72	750±8	751±18
41	0.0648±0.0020	1.088±0.032	0.1217±0.0012	0.0382±0.0005	0.90	769±63	740±7	748±15
42	0.0671±0.0021	0.970±0.028	0.1049±0.0011	0.0324±0.0005	0.68	840±63	643±6	688±14
43	0.0633±0.0015	1.072±0.023	0.1228±0.0010	0.0399±0.0005	0.69	718±49	747±6	740±11
45	0.0620±0.0010	1.052±0.015	0.1231±0.0009	0.0384±0.0004	0.49	674±34	749±5	730±7
46	0.0652±0.0014	0.953±0.019	0.1060±0.0009	0.0349±0.0004	1.04	781±45	649±5	680±10
47	0.0675±0.0021	1.002±0.030	0.1076±0.0011	0.0332±0.0005	1.01	854±65	659±6	705±15
48	0.0677±0.0012	1.266±0.020	0.1357±0.0010	0.0423±0.0005	0.41	859±37	820±6	831±9
49	0.0680±0.0011	0.796±0.011	0.0849±0.0006	0.0248±0.0002	0.84	869±33	525±4	594±6
50	0.0638±0.0016	1.096±0.026	0.1246±0.0011	0.0413±0.0005	0.95	736±53	757±6	752±12
51	0.0653±0.0015	1.052±0.022	0.1170±0.0010	0.0359±0.0005	0.57	783±48	713±6	730±11
52	0.0662±0.0014	1.038±0.019	0.1137±0.0009	0.0342±0.0004	0.92	814±42	694±5	723±10
53	0.0660±0.0012	1.061±0.018	0.1165±0.0009	0.0387±0.0004	0.51	808±39	711±5	734±9
54	0.0670±0.0011	1.026±0.014	0.1111±0.0008	0.0353±0.0003	1.15	838±33	679±5	717±7
55	0.0686±0.0010	0.842±0.010	0.0890±0.0006	0.0216±0.0002	0.96	888±29	550±4	620±5
56	0.0655±0.0024	1.061±0.037	0.1175±0.0013	0.0386±0.0006	1.26	790±75	716±8	734±18
WD05-34								
1	0.0596±0.0012	0.937±0.016	0.1140±0.0009	0.0347±0.0004	0.75	591±41	696±5	671±9
2	0.0708±0.0026	0.935±0.033	0.0959±0.0011	0.0315±0.0006	0.90	950±73	590±7	670±17
3	0.0629±0.0019	0.975±0.028	0.1124±0.0011	0.0351±0.0006	0.51	705±62	687±6	691±14
4	0.0680±0.0026	0.976±0.036	0.1042±0.0012	0.0379±0.0008	0.60	869±78	639±7	692±19
5	0.0630±0.0025	0.961±0.037	0.1107±0.0013	0.0362±0.0008	0.61	709±83	677±8	684±19
6	0.0623±0.0016	0.973±0.023	0.1134±0.0010	0.0349±0.0005	0.67	684±54	692±6	690±12
8	0.0671±0.0019	0.952±0.025	0.1029±0.0010	0.0336±0.0006	0.58	841±57	631±6	679±13
9	0.0669±0.0024	0.993±0.034	0.1077±0.0012	0.0375±0.0008	0.54	835±72	660±7	701±17
10	0.0625±0.0021	0.941±0.030	0.1093±0.0011	0.0303±0.0005	0.77	690±69	668±7	673±16
11	0.0697±0.0031	0.976±0.042	0.1015±0.0014	0.0324±0.0009	0.57	921±89	623±8	691±21
12	0.0679±0.0026	0.874±0.032	0.0934±0.0011	0.0223±0.0004	3.21	864±78	576±7	638±18
13	0.0641±0.0019	0.987±0.027	0.1117±0.0011	0.0345±0.0006	0.64	745±60	683±6	697±14

表 1(续)

样号及 分析号	测量比值					表面年龄/Ma		
	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{208}\text{Pb}/^{232}\text{Th} \pm 1\sigma$	Th/U	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} \pm 1\sigma$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U} \pm 1\sigma$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U} \pm 1\sigma$
14	0.0666±0.0016	0.987±0.022	0.1076±0.0009	0.0332±0.0005	0.61	824±50	659±5	697±11
15	0.0679±0.0013	1.014±0.017	0.1084±0.0008	0.0358±0.0004	0.81	865±39	663±5	711±9
16	0.0649±0.0019	0.989±0.027	0.1105±0.0011	0.0366±0.0006	0.55	771±59	676±6	698±14
17	0.0652±0.0020	0.983±0.029	0.1094±0.0011	0.0305±0.0005	0.71	780±63	669±6	695±15
18	0.0676±0.0022	0.917±0.028	0.0983±0.0010	0.0285±0.0005	0.89	858±66	605±6	661±15
19	0.0622±0.0016	0.951±0.022	0.1109±0.0010	0.0356±0.0005	0.60	682±53	678±6	679±12
20	0.0620±0.0017	0.962±0.025	0.1125±0.0010	0.0362±0.0006	0.51	675±59	687±6	685±13
21	0.0631±0.0018	0.973±0.026	0.1119±0.0011	0.0366±0.0006	0.54	710±59	684±6	690±13
22	0.0701±0.0030	0.973±0.040	0.1007±0.0013	0.0351±0.0009	0.56	930±86	619±8	690±21
23	0.0687±0.0014	1.011±0.019	0.1067±0.0009	0.0331±0.0003	1.00	890±43	653±5	709±10
24	0.0658±0.0017	1.002±0.024	0.1104±0.0010	0.0373±0.0005	0.55	801±53	675±6	705±12
25	0.0737±0.0029	1.001±0.037	0.0986±0.0012	0.0361±0.0008	0.63	1032±77	606±7	704±19
26	0.0652±0.0018	0.967±0.025	0.1076±0.0010	0.0363±0.0006	0.62	780±57	659±6	687±13
27	0.0647±0.0020	0.995±0.029	0.1116±0.0011	0.0363±0.0007	0.52	765±64	682±7	702±15
28	0.0653±0.0019	1.000±0.027	0.1111±0.0011	0.0339±0.0006	0.51	785±59	679±6	704±14
29	0.0627±0.0017	0.975±0.026	0.1128±0.0011	0.0350±0.0006	0.49	699±58	689±6	691±13
30	0.0627±0.0014	0.977±0.020	0.1130±0.0009	0.0367±0.0005	0.66	698±47	690±5	692±10
31	0.0615±0.0013	0.937±0.018	0.1105±0.0009	0.0327±0.0003	0.87	657±45	675±5	671±10
32	0.0629±0.0020	0.985±0.029	0.1136±0.0011	0.0367±0.0007	0.45	705±65	694±7	696±15
34	0.0642±0.0019	0.974±0.027	0.1100±0.0011	0.0385±0.0007	0.52	748±61	673±6	690±14
35	0.0650±0.0022	0.915±0.029	0.1020±0.0011	0.0344±0.0006	0.71	776±70	626±7	660±16
37	0.0622±0.0010	0.945±0.013	0.1102±0.0008	0.0333±0.0003	1.35	680±34	674±5	675±7
38	0.0672±0.0017	0.960±0.023	0.1036±0.0009	0.0322±0.0004	0.83	844±53	636±5	683±12
39	0.0632±0.0014	0.981±0.020	0.1126±0.0009	0.0371±0.0005	0.65	713±47	688±5	694±10
41	0.0627±0.0023	0.974±0.034	0.1126±0.0013	0.0397±0.0009	0.46	699±75	688±7	691±17
42	0.0622±0.0018	0.968±0.026	0.1128±0.0011	0.0406±0.0007	0.51	682±60	689±6	688±13
43	0.0629±0.0016	0.966±0.024	0.1114±0.0010	0.0371±0.0006	0.46	705±55	681±6	687±12
45	0.0634±0.0023	0.981±0.033	0.1123±0.0012	0.0367±0.0007	0.57	722±74	686±7	694±17
46	0.0645±0.0023	0.987±0.034	0.1110±0.0013	0.0382±0.0009	0.46	757±74	678±7	697±17
49	0.0676±0.0020	1.032±0.029	0.1107±0.0011	0.0367±0.0007	0.54	857±60	677±6	720±14
50	0.0625±0.0015	0.969±0.022	0.1123±0.0010	0.0331±0.0004	1.08	693±51	686±6	688±11
53	0.0622±0.0018	0.971±0.026	0.1131±0.0011	0.0373±0.0007	0.46	682±59	691±6	689±13
54	0.0663±0.0013	1.017±0.017	0.1112±0.0009	0.0359±0.0004	0.81	816±39	680±5	713±9
56	0.0639±0.0041	0.955±0.060	0.1083±0.0020	0.0387±0.0016	0.45	739±131	663±12	681±31
57	0.0698±0.0040	0.958±0.053	0.0995±0.0016	0.0464±0.0016	0.40	921±114	612±10	682±28
WD06-04								
2	0.0631±0.0033	0.970±0.048	0.1115±0.0017	0.0392±0.0010	0.69	712±106	682±10	689±25
3	0.0656±0.0008	1.195±0.012	0.1322±0.0009	0.0413±0.0003	0.64	793±27	800±5	798±6
4	0.0629±0.0021	0.968±0.031	0.1117±0.0012	0.0360±0.0007	0.67	705±70	682±7	688±16
6	0.0641±0.0015	0.988±0.022	0.1119±0.0010	0.0366±0.0005	0.68	744±49	684±6	698±11
11	0.0626±0.0023	0.969±0.034	0.1123±0.0013	0.0353±0.0008	0.52	695±77	686±7	688±18
13	0.0617±0.0021	0.940±0.030	0.1105±0.0012	0.0352±0.0005	0.98	663±71	676±7	673±16
14	0.0647±0.0019	0.191±0.005	0.0214±0.0002	0.0076±0.0001	1.83	764±62	136±1	177±5
WD05-26								
3	0.0637±0.0012	0.905±0.015	0.1030±0.0008	0.0313±0.0003	0.97	731±39	632±5	654±8
4	0.0633±0.0011	0.960±0.015	0.1101±0.0008	0.0333±0.0003	1.51	717±36	673±5	683±8
5	0.0623±0.0010	0.958±0.013	0.1116±0.0008	0.0349±0.0003	1.28	683±34	682±5	682±7
6	0.0621±0.0017	0.946±0.025	0.1106±0.0011	0.0340±0.0003	4.58	677±58	676±6	676±13
7	0.0614±0.0009	0.950±0.011	0.1123±0.0008	0.0345±0.0002	1.67	652±30	686±5	678±6
8	0.0625±0.0011	0.952±0.014	0.1104±0.0008	0.0336±0.0003	1.56	693±36	675±5	679±7
9	0.0619±0.0011	0.945±0.015	0.1108±0.0009	0.0342±0.0003	2.01	670±38	677±5	676±8
10	0.0601±0.0009	0.781±0.010	0.0944±0.0007	0.0287±0.0002	1.29	605±33	582±4	586±6

表 1(续)

样号及 分析号	测量比值				表面年龄/Ma			
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th±1σ	Th/U	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb±1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U±1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U±1σ
11	0.0606±0.0009	0.941±0.011	0.1126±0.0008	0.0352±0.0002	2.38	625±31	688±5	673±6
12	0.0620±0.0012	0.958±0.017	0.1121±0.0009	0.0335±0.0003	2.47	675±41	685±5	682±9
13	0.0648±0.0010	0.941±0.012	0.1053±0.0008	0.0322±0.0002	1.87	768±31	646±4	674±6
14	0.0617±0.0011	0.616±0.009	0.0725±0.0005	0.0223±0.0002	1.43	663±36	451±3	488±6
15	0.0603±0.0011	0.779±0.012	0.0937±0.0007	0.0295±0.0002	2.19	616±37	577±4	585±7
18	0.0625±0.0020	0.957±0.030	0.1111±0.0012	0.0368±0.0005	1.27	691±68	679±7	682±15
20	0.0648±0.0023	1.087±0.038	0.1216±0.0014	0.0396±0.0006	1.28	769±74	740±8	747±18
21	0.0604±0.0012	0.928±0.017	0.1114±0.0009	0.0358±0.0003	2.68	617±42	681±5	666±9
22	0.0635±0.0015	0.957±0.020	0.1093±0.0009	0.0342±0.0003	2.60	725±48	668±5	682±11
24	0.0658±0.0012	1.084±0.017	0.1195±0.0009	0.0384±0.0003	2.57	800±36	728±5	745±8
26	0.0618±0.0020	0.680±0.020	0.0798±0.0008	0.0191±0.0002	2.38	668±66	495±5	527±12
29	0.0656±0.0015	0.908±0.020	0.1005±0.0009	0.0332±0.0004	0.93	793±48	617±5	656±10
30	0.0625±0.0013	0.881±0.016	0.1023±0.0008	0.0351±0.0002	4.32	691±42	628±5	642±9
31	0.0644±0.0013	0.968±0.017	0.1091±0.0009	0.0360±0.0003	1.50	753±41	668±5	688±9
32	0.0618±0.0010	0.732±0.010	0.0859±0.0006	0.0257±0.0002	1.65	667±33	531±4	558±6
36	0.0622±0.0012	0.947±0.016	0.1104±0.0009	0.0352±0.0003	2.23	680±40	675±5	676±8
37	0.0604±0.0009	0.778±0.010	0.0934±0.0007	0.0259±0.0002	1.79	619±32	576±4	584±6
38	0.0622±0.0009	0.954±0.011	0.1112±0.0008	0.0341±0.0002	3.14	682±29	680±5	680±6
39	0.0606±0.0011	0.932±0.015	0.1116±0.0009	0.0377±0.0003	1.57	623±38	682±5	669±8
40	0.0620±0.0009	0.949±0.012	0.1111±0.0008	0.0351±0.0002	1.49	673±31	679±5	678±6
41	0.0593±0.0010	0.578±0.008	0.0706±0.0005	0.0209±0.0001	2.38	579±35	440±3	463±5
42	0.0593±0.0013	0.769±0.015	0.0940±0.0008	0.0308±0.0003	2.12	578±45	579±5	579±9
43	0.0589±0.0009	0.917±0.011	0.1129±0.0008	0.0358±0.0002	1.63	565±31	690±5	661±6
44	0.0662±0.0020	1.241±0.035	0.1361±0.0014	0.0457±0.0006	1.27	811±61	822±8	819±16
45	0.0604±0.0008	0.787±0.009	0.0946±0.0007	0.0282±0.0002	2.01	618±29	583±4	590±5
46	0.0617±0.0009	1.033±0.013	0.1214±0.0009	0.0386±0.0003	1.47	665±31	739±5	720±7
47	0.0647±0.0009	0.923±0.011	0.1035±0.0007	0.0331±0.0002	2.01	765±30	635±4	664±6
49	0.0678±0.0017	0.874±0.020	0.0935±0.0009	0.0354±0.0003	2.14	862±51	576±5	638±11
51	0.0631±0.0009	0.956±0.011	0.1099±0.0008	0.0349±0.0002	1.99	712±29	672±4	681±6
52	0.0600±0.0008	0.857±0.009	0.1035±0.0007	0.0329±0.0002	2.36	605±27	635±4	628±5
53	0.0609±0.0011	0.742±0.012	0.0884±0.0007	0.0273±0.0002	1.98	634±38	546±4	563±7
54	0.0593±0.0011	0.766±0.012	0.0937±0.0007	0.0350±0.0003	1.39	579±38	577±4	578±7

3.1 武当山群

样品 WD05-50 采自区域南部房县榔口附近 (N32°02.699', E111°02.600'), 共测量了 42 粒锆石, 其中 31 粒锆石的 U-Pb 同位素组成落于谐和曲线, 11 粒锆石存在不同程度的 Pb 丢失. 全部锆石获得了 (757±5) Ma (MSWD = 0.79, 95% 置信度, 下同) 的上交点年龄 (图 2(a)), 31 粒谐和锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (755±3) Ma (MSWD = 1.19), 两年龄值在分析误差范围内相互吻合, 代表了火山岩的形成时间.

样品 WD06-02 出露于区域东部丹江口新河镇 (N32°28.339', E111°26.317'), 对 39 粒锆石进行了分析, 其中 30 粒锆石获得了谐和年龄, 9 粒不谐和锆石表现为少量 Pb 丢失 (图 2(b)). 谐和锆石在谐和曲线上分成 2 组, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄分别为 (757±2) (MSWD = 1.13, n = 23) 和 (817±11) Ma (MSWD = 3.5,

n = 7). 由 23 粒谐和锆石获得的年龄与样品 WD05-50 相同, 代表了岩浆作用的时间, 而由 7 粒锆石组成的第 2 组年龄代表了捕获锆石的年龄, 它们的阴极发光图像表现为暗色但晶形完整的内核, 并存在细小的具振荡环带浅色外缘. 第 1 组锆石表现为振荡环带显著、无内核的短柱状锆石. 较大的 MSWD 值和加权平均年龄误差表明, 捕获的 7 粒谐和锆石可能实际上是由形成年龄有一定差异的锆石组成, 其 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄分布范围为 (802±7) ~ (833±5) Ma.

样品 WD06-06 采自区域北部武当山景区内的八仙观 (N32°26.148', E111°03.673'), 对 25 粒锆石进行了分析, 其中 20 粒锆石获得了谐和年龄 (图 2(c)). 谐和锆石同样分成 2 组, 其中 18 粒锆石的 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 加权平均年龄为 (752±3) Ma (MSWD = 0.38), 与前面的 2 件样品相同, 代表了火山岩的形成时间. 另外 2 粒谐

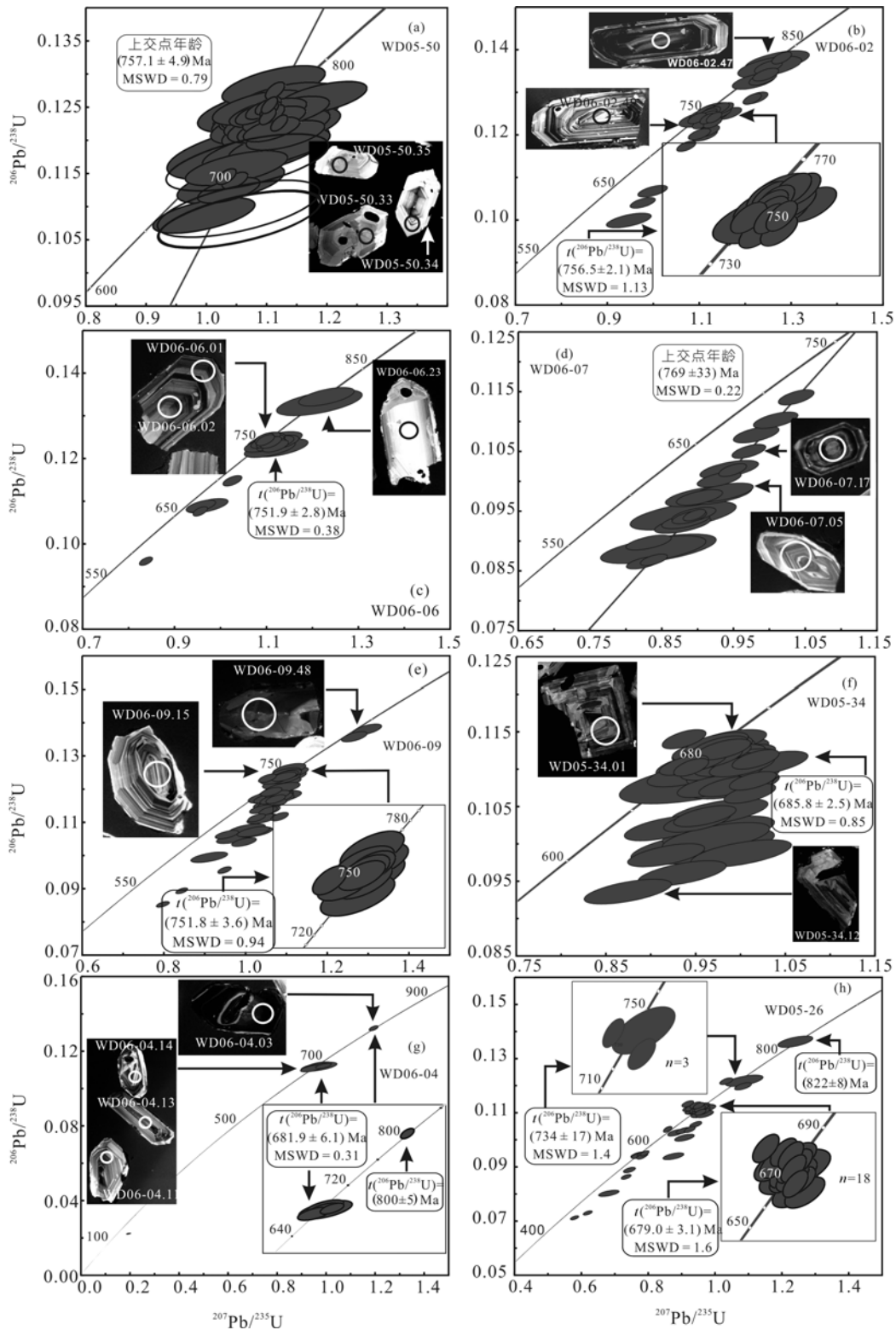


图 2 武当山群(a)~(e)、耀岭河群火山岩(f)~(g)及基性侵入岩(h)锆石 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ - $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 谐和曲线图

和锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 (805 ± 12) 和 (813 ± 8) Ma, 代表了捕获锆石的年龄。

样品 WD06-07 采自区域西部竹山县三台(N32°18.433', E110°12.740'), 对 22 粒锆石进行了测量, 但全部锆石的U-Pb同位素组成均不谐和(图 2(d)). 在谐和图上, 其构成的不一致线与谐和曲线的上交点获得了 (769 ± 33) Ma(MSWD = 0.22)的上交点年龄, 在误差范围内, 与前述样品的形成年龄基本符合。

样品 WD06-09 采自区域西部竹山县南口(N32°23.727', E110°11.752'), 对 42 粒锆石进行了分析. 去除Pb丢失较明显的 4 粒锆石后, 由 36 粒锆石构成的不一致线与谐和曲线的上交点获得了 (749 ± 8) Ma(MSWD = 0.93)上交点年龄(图 2(e)), 且由其中 11 粒谐和锆石获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (752 ± 4) Ma(MSWD = 0.94). 另外 2 粒基本谐和的捕获锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄分别为 (820 ± 6) 和 (833 ± 6) Ma.

3.2 耀岭河群

耀岭河群 2 件火山岩样品 WD06-04 和 WD05-34 分别采自区域北部陨县桂花乡小学附近(N32°54.571', E110°49.833') 和西部竹山县德胜铺坛山村口(N32°28.581', E109°51.352'). 对样品 WD05-34 中的 47 粒锆石进行了分析(图 2(e)), 其中 22 粒谐和锆石获得的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (686 ± 3) Ma(MSWD = 0.85). 其余锆石具有不同程度的Pb丢失, 且其 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄均小于 680 Ma.

样品 WD06-04 中仅分选出了 7 粒锆石, 其中 6 粒具谐和的U-Pb同位素组成(图 2(f)). 除 1 粒谐和锆石具有 (800 ± 5) Ma的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄外, 其余 5 粒谐和锆石组成相近, 获得了 (682 ± 6) Ma(MSWD=0.31)加权平均年龄. 年龄 (800 ± 5) 和 (682 ± 6) Ma分别被解释为捕获锆石和耀岭河群火山岩的形成年龄。

3.3 基性侵入岩

变辉长岩岩体 WD05-26 样品采自竹山县双台乡桃园附近(N32°25.342', E110°12.868'), 对其中 40 粒锆石进行了分析, 其中 29 粒锆石具有谐和的U-Pb同位素组成(图 2(g)). 谐和锆石中的 18 粒具有相近的同位素组成, 给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (679 ± 3) Ma (MSWD=1.6), 由组成相近的另外 3 粒锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均为 (734 ± 17) Ma (MSWD=1.4), 另 1 粒谐和锆石的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄为 (822 ± 8) Ma. 由于基性侵入岩的围岩约为 755 Ma的武当山群, 因此年龄为 (734 ± 17) 和 (822 ± 8) Ma的两组锆石应分别代

表了被捕获的武当山群岩浆锆石和更早期的残留锆石. 另一组组成相近的 6 粒谐和锆石给出了 (579 ± 3) Ma (MSWD=0.46)的加权平均年龄, 由于该年龄小于覆盖于基性岩体之上的震旦纪地层的时代, 显然应代表了后期热事件的年龄. 因此, (679 ± 3) Ma被解释为基性侵入岩体的形成时代. 另 1 粒 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄为 (635 ± 4) Ma的谐和锆石, 可能代表了另一次较弱的热事件。

4 讨论

对区域内武当山火山岩进行锆石原位 U-Pb 同位素定年的结果表明, 武当山群不同出露区的火山岩形成于 (755 ± 3) Ma的相同时间(对 5 件样品的加权平均值, MSWD=0.47, 95%置信度), 而耀岭河群火山岩(两件样品加权平均年龄值为 (685 ± 5) Ma, MSWD=0.36, 95%置信度)与基性侵入岩群(679 ± 3 Ma)的年龄在误差范围内相同. 这与耀岭河群碱性玄武岩与武当辉长-辉绿岩群之间具相近的地球化学性质相符合^[9~11].

前人对武当山群火山岩的形成时代进行过长期研究, 但仅常规法锆石U-Pb年龄值就有 2417~315 Ma 的变化范围, 而Rb-Sr, K-Ar(^{40}Ar - ^{39}Ar)法年龄则更加分散^[12]. 张宗清等人^[13]和周鼎武等人^[9]对耀岭河群火山岩进行Sm-Nd同位素定年, 分别获得了 (1005 ± 122) 和 (782 ± 164) Ma的等时年龄. 张宗清等人^[6]在报道武当地区岩浆岩定年研究时提出, 武当山群火山岩系主体形成于约 19 亿年的古元古代, 武当山群中的部分火山岩(如房县太子坡)的时代和同位素特征与耀岭河群火山岩相似. 由于位处南秦岭造山带的武当地区经历了较强烈的多期变形和变质作用叠加, 不仅会引起Rb-Sr, K-Ar, 甚至Sm-Nd同位素体系不同程度的开放, 而且也会导致锆石不同程度地发生Pb的丢失现象(如在WD06-07, WD05-26 中所观察到的不谐和锆石), 加上多数岩浆岩中不同程度地含有捕获锆石, 这些原因应是导致武当地区早期同位素定年数据彼此间不能对比的主要原因。

蔡志勇等人^[14]近期报道了房县五谷庙杨坪组变沉积岩晶屑凝灰岩夹层中的化学法锆石U-Pb定年结果, 在全部 5 粒锆石中有 3 粒谐和锆石给出的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 (744 ± 36) Ma, 虽精度稍差, 但仍与本文结果在分析误差范围内相同. 但该文作者将另 1 粒不谐和锆石(1593 ± 49) Ma的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄解释为武当山群下部的年龄。

基于早期同位素定年数据,包括本文作者在内^[11]的多数研究者将武当山群和耀岭河群火山岩及基性侵入岩群视为晋宁期(约 830~780 Ma)或更早期岩浆作用的产物。本文获得的同位素定年结果表明,它们形成的时代明显要晚。然而,晋宁期岩浆事件仍以捕获锆石的形式被记录下来,指示武当地区可能存在未出露的晋宁期基底岩系或下部的杨坪组沉积岩至少部分物源区来自扬子陆块的晋宁期岩浆岩,表明南秦岭武当地区于新元古代早期应属扬子克拉通现今北缘的组成部分。

作者曾对位于扬子陆核的黄陵杂岩体进行了类似的锆石原位 U-Pb 定年,其主要的岩浆作用发生于 820~790 Ma,但最晚的晓峰岩套双峰式侵入岩系形成的时间为(744 ± 22) Ma^[15],与马国干等人^[16]报道的峡东地区南华-震旦系标准剖面中莲沱组底部凝灰质火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年结果(748 ± 12) Ma 相同。本文数据表明,武当山群的形成时代与莲沱组底部相当,但无论是火山岩还是沉积岩,其规模(构造地层厚度 > 2000 m¹⁾)明显大于峡东莲沱组地层(70~50 m^[17])。因此,武当地区更完整地记录了扬子克拉通南华纪(原震旦纪下部地层)初期的区域拉张-沉积事件。耀岭河群玄武岩和基性侵入岩群属同时代形成、源区性质相似的拉张背景深部幔源岩浆岩^[10,11],其形成时代略早于峡东地层南沱组(663~635 Ma^[18-20])。耀岭河群地层的构造地层厚度大于 1500 m¹⁾,远大于峡东剖面南沱组的 150~90 m^[17]。此外,峡东南沱组地层在岩性上以含砾冰碛泥岩为主,未见火山岩的报道。显然,耀岭河群与峡东南沱组并不能直接对比,可能代表了发生于扬子克拉通北部的另一次重要的构造-岩浆事件。

晋宁期约 830~745 Ma 的岩浆事件被认为是扬子克拉通对新元古代地幔柱作用在地表的反映,其中 830~795 和 780~745 Ma 分别对应了 Rodinia 超大陆开始张裂和最终裂解两个演化阶段^[21],其中 830~790 Ma 的岩浆事件在扬子克拉通周边地区^[22-24]和内部^[16]均被广泛记录,而~755 Ma 的岩浆事件在扬子克拉通西缘康滇裂谷(闪长-辉长质岩墙^[21,25]、埃达克质侵入杂岩^[26]、辉长质侵入体^[27])和大别-苏鲁造山带超高压相变质岩中^[2,3]均有记录。Zheng 等人^[3]通过对大别-苏鲁造山带超高压变质岩系统的锆石 U-Pb 定年,识

别出时代为(758 ± 15) Ma 的双峰式岩浆事件。通过锆石 U-Pb 定年和 Hf-O 同位素分析, Zheng 等人^[28]提出这些新元古代岩浆岩系代表了亏损地幔提取并快速再造的新生地壳,并指示了其形成环境可能代表了裂解大陆边缘。武当山群、耀岭河群变玄武岩和基性侵入岩群中均存在两种岩性:拉斑玄武岩和碱性玄武岩。碱性玄武岩系具有高 Ti 的地球化学特征,且除武当山群部分样品具中等程度的 Nb 和 Ta 亏损外,其余样品均无明显的 HFSE 亏损。其中武当山群碱性玄武岩的 TiO₂ 含量为 2.3%~4.5%, ε_{Nd}(750 Ma) 高达 +6.6 ~ +8.9, 而拉斑玄武岩为 +3.3 ~ +5.5 (本文作者未发表数据,下同);耀岭河群变碱性玄武岩 TiO₂ 含量为 2.5%~6.6%, ε_{Nd}(750 Ma) 为 +3.5 ~ +7.6;碱性辉长岩 TiO₂ 含量为 1.6%~4.2%, ε_{Nd}(750 Ma) 为 +2.2 ~ +5.1,拉斑玄武岩辉长岩为 +3.0 ~ +6.6,指示了于 755~680 Ma 期间存在深源亏损地幔来源岩浆的加入和板内拉张的构造环境。根据 Hf-Nd 同位素的相关性特征^[29],本文报道的南秦岭与大别造山带~750 Ma 双峰式岩浆岩^[3,28]的 Nd-Hf 同位素组成指示了亏损程度相当的地幔源区,表明~750 Ma 的岩浆事件可能由大别-苏鲁造山带向西延伸到了南秦岭地区。此外, Li 等人^[30]报道了澳大利亚西北部 Mundine Well 辉长-辉绿岩墙群((755 ± 3) Ma) 的元素和 Nd-Hf 同位素地球化学特征,认为其具有 OIB 的属性,并与康滇裂谷拉斑质基性岩墙一起,代表了 Rodinia 超大陆裂解过程晚期的产物。这些基性岩墙实际上与武当地区同期拉斑质基性岩具有相同的 ε_{Nd}(t) 值。目前还不能确定南秦岭-大别-苏鲁造山带~755 Ma 的岩浆岩带是否向西连续延伸到了扬子克拉通的西缘以及扬子克拉通周边~755 Ma 的岩浆事件与澳大利亚 Mundine Well 辉长-辉绿岩墙群在成因上的关系,开展系统的地球化学对比研究将为此提供线索。

南秦岭武当地区~680 Ma 的岩浆作用在扬子克拉通其他地区目前未见报道,这不仅说明与扬子克拉通新元古代陆内裂解相关的构造岩浆事件持续了更长的时间,且由拉斑玄武岩向深源碱性玄武岩的岩浆作用演化,并伴随大量近源沉积物的快速堆积指示,南秦岭武当地区指示了扬子克拉通于 755~680 Ma 期间一次重要的陆内拉张环境下的岩浆作用,并导致最终与其他大陆裂解。

1) 湖北省区域地质矿产调查所,白桑关幅、袁家山幅、习家店幅、玉堤店幅、栗子坪幅、武当山镇幅和丁家营幅区域地质调查报告(1:5 万),1997

5 结论

武当山群火山岩的形成时代为 (755 ± 3) Ma, 而耀岭河群火山岩 (685 ± 5) Ma的年龄与基性侵入岩群 (679 ± 3) Ma的年龄在分析误差范围内相同, 所获年龄均明显小于早期多数文献的报道值。武当山群和耀岭河群火山-沉积岩地层的时代分别相当于峡东剖面的莲沱组和略早于南沱组, 岩浆岩中捕获锆石显示, 南秦岭武当地区存在与扬子克拉通内部和陆缘区时代相同的 830~780 Ma岩浆事件记录, 指示了区域内存在晋宁期基底岩系或来自扬子克拉通北缘晋宁期物源区沉积物, 表明新元古代时期南秦岭武当地区是现今扬子克拉通北缘的组成部分。南秦岭-大别-苏鲁造山带共同组成一条时代为~755 Ma的拉张环境下的双峰式岩浆岩带, 而南秦岭年龄为~680 Ma的拉斑质-碱性玄武质岩浆岩组合可能指示了扬子克拉通与Rodinia超大陆的完全裂解。

致谢 两位评审人对初稿提出的修改意见提高了文章质量。野外工作期间, 湖北省地质调查院邓乾忠、陈铁龙、何仁亮高级工程师等人对野外工作提供了大力协助, 并进行了有益的讨论, 在此一并感谢。

参 考 文 献

- Cong B L. Ultrahigh-Pressure Metamorphic Rocks in the Dabie-shan-Sulu Region of China. Beijing: Science Press, 1996
- Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie-Sulu orogen in China: Implications for geodynamics and fluid regime. *Earth Sci Rev*, 2003, 62: 105—161 [DOI]
- Zheng Y F, Wu Y B, Chen F K, et al. Zircon U-Pb and oxygen isotope evidence for a large-scale ^{18}O depletion event in igneous rocks during the Neoproterozoic. *Geochim Cosmochim Acta*, 2004, 68: 4159—4179
- 薛怀民, 董树文, 刘晓春. 大别山东部花岗片麻岩的锆石 U-Pb 年龄. *地质科学*, 2002, 37(2): 165—173
- 张国伟, 张宗清. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其大地构造意义. *岩石学报*, 1995, 11(2): 101—114
- 张宗清, 张国伟, 唐索寒, 等. 武当群变质岩年龄. *中国地质*, 2002, 29(2): 117—125
- Yuan H L, Gao S, Liu X M, et al. Accurate U-Pb age and trace element determinations of zircon by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry. *Geostan Geoanal Res*, 2004, 28: 353—370 [DOI]
- 柳小明, 高山, 凌文黎, 等. 扬子克拉通 35 亿年碎屑锆石的发现及其地质意义. *自然科学进展*, 2005, 15(11): 1334—1337
- 周鼎武, 张成立, 刘良, 等. 武当地块基性岩墙群的 Sm-Nd 定年及其相关问题讨论. *地球学报*, 1998, 19(1): 25—30
- 张成立, 周鼎武, 金海龙, 等. 武当地块基性岩墙群及耀岭河群基性火山岩的 Sr, Nd, Pb, O 同位素研究. *岩石学报*, 1999, 15(3): 430—437
- 凌文黎, 程建萍, 王欲华, 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. *岩石学报*, 2002, 18(1): 25—36
- 陈晋镛, 秦正永, 王寿琼, 等. 武当群地质特征. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1991. 130
- 张宗清, 张国伟, 傅国民, 等. 秦岭变质地层年龄及其构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1996, 26(3): 216—222
- 蔡志勇, 罗洪, 熊小林, 等. 武当群上部变沉积岩组时代归属问题: 单锆石 U-Pb 年龄的制约. *地层学杂志*, 2006, 30(1): 60—63
- 凌文黎, 高山, 程建萍, 等. 扬子陆核与陆缘新元古代岩浆事件对比及其构造意义-来自黄陵和汉南侵入杂岩 ELA-ICPMS 锆石 U-Pb 同位素年代学的约束. *岩石学报*, 2006, 22(2): 387—396
- 马国干, 李华芹, 张自超. 华南地区震旦纪时限范围的研究. *中国地质科学院宜昌地质矿产研究所所刊*, 1984, 8: 1—30
- 湖北省地质局三峡地层研究组. 峡东地区震旦纪至二叠纪地层古生物. 北京: 地质出版社, 1978
- Zhou C M, Tucker R S, Xiao H, et al. New constraints on the ages of Neoproterozoic glaciation in South China. *Geology*, 2004, 32: 437—440 [DOI]
- 储雪雷, Wdfgang Todt, 张启锐, 等. 南华-震旦系界线的锆石 U-Pt 年龄. *科学通报*, 2005, 50(6): 610—612
- Condon D, Zhu M, Bowring S, et al. U-Pb Ages from the Neoproterozoic Doushantuo Formation, China. *Science*, 2005, 308: 95—98 [DOI]
- Li Z X, Li X H, Kinny P D, et al. Geochronology of Neoproterozoic syn-rift magmatism in the Yangtze craton, South China and correlations with other continents: Evidence for a mantle superplume that broke up Rodinia. *Precamb Res*, 2003, 122: 85—109 [DOI]
- Li Z X, Zhang L, Powell C M. South China in Rodinia: Part of the missing link between Australia-East Antarctica and Laurentia? *Geology*, 1995, 23: 407—410 [DOI]
- Li X H. U-Pb zircon ages of granites from the southern margin of the Yangtze Block: Timing of Neoproterozoic Jinning orogeny in SE China and implications for Rodinia Assembly. *Precamb Res*, 1999, 97: 43—57 [DOI]
- Wu R X, Zheng Y F, Wu Y B, et al. Reworking of juvenile crust: Element and isotope evidence from Neoproterozoic granodiorite in South China. *Precamb Res*, 2006, 146: 179—212 [DOI]
- 林广春, 李献华, 李武显. 川西新元古代基性岩墙群的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、元素和 Nd-Hf 同位素地球化学: 岩石成因与构造意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(7): 630—645
- Zhou M F, Yan D P, Wang C, et al. Subduction-related origin of the 750 Ma Xuelongbao adakitic complex (Sichuan Province, China): Implications for the tectonic setting of the giant Neoproterozoic magmatic event in South China. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 248: 271—285 [DOI]
- Zhao J H, Zhou M F. Geochemistry of Neoproterozoic mafic intrusions in the Panzhihua district (Sichuan Province, SW China): Implications for subduction-related metasomatism in the upper mantle. *Precamb Res*, 2007, 152: 27—47 [DOI]
- Zheng Y F, Zhao Z F, Wu Y B, et al. Zircon U-Pb age, Hf and O isotope constraints on protolith origin of ultrahigh-pressure eclogite and gneiss in the Dabie orogen. *Chem Geol*, 2006, 231: 135—158 [DOI]
- White W M, Patchett P J. Hf-Nd-Sr and incompatible element abundances in island arcs: Implications for Magma origins and crust-Mantle evolution. *Earth Planet Sci Lett*, 1984, 67: 167—185 [DOI]
- Li X H, Li Z X, Wingate M T D, et al. Geochemistry of the 755 Ma Mundine Well dyke swarm, northwestern Australia: Part of a Neoproterozoic mantle superplume beneath Rodinia? *Precamb Res*, 2006, 146: 1—15 [DOI]