

秦岭佛坪变质结晶岩系年龄和物质组成特征 ——SHRIMP 锆英石 U-Pb 年代学和全岩 Sm-Nd 年代学数据

张宗清¹ 宋彪¹ 唐索寒¹ 张寿广¹ 杨永成² 王进辉¹

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 陕西省地勘局区调研究院, 陕西 咸阳 712000)

摘要: 秦岭是长期多阶段发展的复杂大陆碰撞造山带。本文报道了位于造山带中部佛坪变质结晶杂岩系的 SHRIMP 锆英石 U-Pb 年龄和全岩 Sm-Nd 年龄同位素分析结果。变质岩 SHRIMP 锆英石 U-Pb 年龄十分复杂, 除有少量太古宇形成的锆英石外, 还存在大量元古宇至显生宇的锆英石, 并在 2 000 Ma, 1 200 Ma, 800 Ma, 400 Ma, 200 Ma 左右形成峰期。片麻岩 Nd 模式年龄 t_{DM} 1 372~2 081 Ma。佛坪变质结晶岩系主体可能形成于古元古代, 年龄 2 000 Ma 左右。在后期强烈地质作用中有少量地幔物质加入。岩系形成于新太古代的意见笔者没有得到证实。秦岭造山带中部可能存在或存在过太古宙结晶基底岩石。

关键词: 佛坪变质结晶杂岩系; 同位素年代学; 秦岭造山带

中图分类号: P597 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3657(2004)02-0161-08

横亘中国中部的秦岭山脉是亚洲东部两个最大板块——中朝克拉通华北板块和扬子克拉通板块结合区域, 在中国大地构造研究中占着十分重要地位。其形成和演化历史经过多年研究已取得重大进展。但是由于秦岭长期、多阶段发展的复杂历史, 致使其许多基础地质问题仍然意见不一, 有待深入研究。出露于秦岭中部的佛坪古老变质结晶岩系的年龄就是争论问题之一。长期以来, 佛坪变质结晶岩系被认为形成于元古宙, 并与耀岭河变质火山岩对比^[1]。但是近年多次报道, 认定岩石形成于太古宇, 年龄(2 506±24) Ma 左右^[2-3]。在 1:50 000 佛坪幅填图中, 也将该古老变质结晶岩系时代归属于新太古代。关于秦岭造山带的基底, 近年研究表明, 除造山带西南边缘的鱼洞子群为太古宙外, 其余地区均由元古宙变质火山—沉积岩组成^[4,5,9]。佛坪太古宇变质结晶岩系的发现, 为秦岭造山带构造演化历史研究提供了新的信息, 为大地质学家所重视。为了确定这套变质岩系的年代, 笔者对这套岩石进行了 SHRIMP 锆英石 U-Pb 年代学和全岩 Sm-Nd 年代学工作。所获得的结果有别前人的报道, 现公布如下。

1 地质概况

佛坪古老变质结晶岩系出露于陕西省佛坪县佛坪穹隆核部。该区地质概况见图 1。穹隆位于南秦岭中部, 商丹缝合带和勉略缝合带之间, 东西秦岭过渡带, 造山带最狭窄部位。

穹隆盖层主要由一套变质泥砂质岩石组成, 如石墨大理岩、石英岩、黑云石英片岩、二云母石英片岩、夕线石榴黑云石英片岩、黑云钾长(二长)片麻岩等。盖层时代一般认为属震旦系—石炭系, 或上元古界^[1,3,5]。穹隆核部由一套强变质变形和部分重熔的结晶岩石—片麻岩类和斜长角闪岩类组成。片麻岩主要有黑云斜长(二长)片麻岩、角闪斜长片麻岩、石榴黑云斜长片麻岩等。斜长角闪岩、角闪岩常呈大小不等包体产出于长英质黑云斜长(二长)片麻岩中。在佛坪镇南有中酸性麻粒岩和刚玉片麻岩产出^[6]。穹隆核部强烈变质变形结晶岩系在 1:5 万佛坪幅中分别命名为龙草坪片麻岩套和佛坪岩群, 时代归属于新太古代(图 1)。

样品采自龙草坪至佛坪一线。锆英石 U-Pb 年龄样品采自龙草坪和龙草坪南部南沟河床。Sm-Nd 年龄样品采自龙草坪—南沟和佛坪镇南, 沿公路剖面采集。

2 样品地球化学特征

从主、微量元素组成(表 1)的部分样品可以看出, 样品主要由中酸性变质岩组成。过去认为这套变质岩系原岩相当于耀岭河群变质火山岩或 TTG 岩类^[1,3]。但是从分析的主、微量元素组成看, 与 TTG 岩类组成有较大差别。Na₂O/K₂O 比值 0.5~1.3。TTG 岩类 Na₂O/K₂O 比值一般大于 1.6。在分析

收稿日期: 2004-01-07; 改回日期: 2004-02-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(40072071); 中国地质调查局地质大调查项目(200313000057)资助

作者简介: 张宗清, 男, 1941 年生, 研究员, 长期从事同位素年代学和地球化学工作; E-mail: Zhangzongqing@cags.jl.cn.

① 万义文, 佛坪刚玉. 秦岭区测, 1979, (1): 13~22.

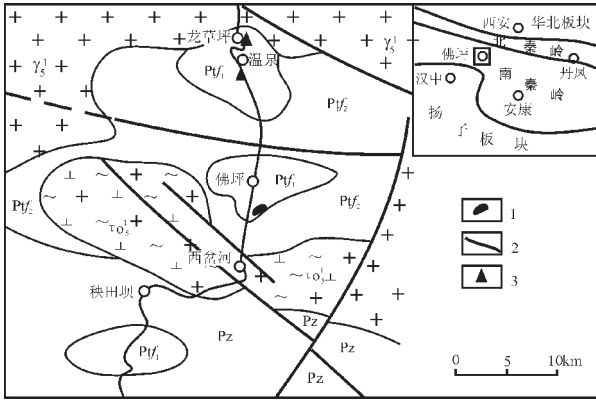


图1 秦岭佛坪一带地质略图^[6]

Pz—古生代变质砂岩、碳酸盐岩、千枚岩; Ptf¹—佛坪穹隆盖层变质泥砂质岩石; Ptf²—佛坪穹隆核部佛坪变质结晶岩系; γ_5^1 —印支期二长花岗岩; τO_5^1 —印支期闪长岩; 1—麻粒岩和刚玉片麻岩产地; 2—断层; 3—U—Pb 年龄采样点

Fig. 1 Geological sketch map of the Foping area in the Qinling Mountains^[6]

Pz—Paleozoic metamorphic sandstones, carbonatites, phylites; Ptf¹—metamorphic argillaceous-arenaceous sediments of the cover of the Euping dome; Ptf²—metamorphic crystalline rock of the core of the Euping dome; γ_5^1 —Indosinian monzogranites; τO_5^1 —Indosinian diorites; 1—occurrence of granulites and corundum gneisses; 2—fault; 3—sampling location of U—Pb ages of zircons

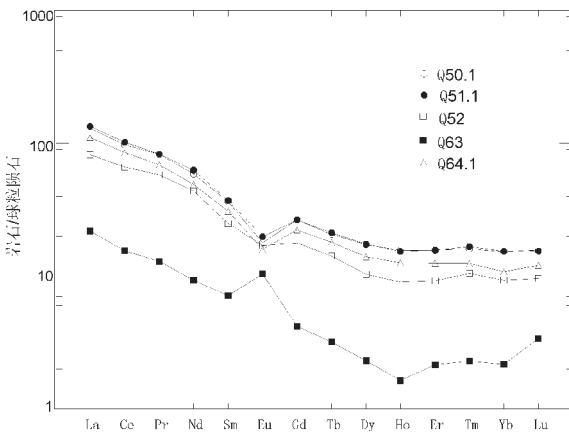


图2 佛坪变质结晶岩系样品稀土分布模式

Fig. 2 REE distribution patterns for metamorphic crystalline rocks in the Foping area

的5个样品中, 尽管其岩石主元素组成不同, 但是稀土分布模式形态十分类似(图2), 为一系列近于平行的曲线, La为球粒陨石的100倍左右, Lu为球粒陨石的10~20倍。多数样品具有Eu负异常。样品Q63与其他样品不同, 稀土元素含量低, 具正Eu异常, 主元素组成SiO₂高(74.08%), TiO₂、

表1 佛坪变质结晶岩系样品主、微量元素化学组成
Table 1 Major and trace element compositions of metamorphic crystalline rocks in the Foping area

样品	Q50.1	Q51.1	Q52	Q63	Q64.1
SiO ₂ %	62.66	62.56	57.48	74.08	70.27
TiO ₂	0.77	0.77	0.81	0.14	0.66
Al ₂ O ₃	16.03	16.27	14.97	14.04	12.61
Fe ₂ O ₃	1.22	1.17	1.76	0.16	1.00
FeO	4.92	4.98	4.45	0.92	3.75
MnO	0.11	0.12	0.12	0.05	0.12
MgO	3.27	3.19	5.52	0.36	2.43
CaO	2.53	2.55	5.73	2.15	2.90
Na ₂ O	3.61	3.60	3.51	2.59	2.38
K ₂ O	3.12	3.12	2.74	5.09	2.42
P ₂ O ₅	0.16	0.16	0.28	0.03	0.15
LOI	1.27	1.27	2.08	0.67	2.31
Σ	99.67	99.76	99.45	100.28	100.00
La × 10 ⁻⁶	41.00	42.30	25.90	6.91	34.90
Ce	79.20	83.10	54.10	12.60	69.30
Pr	9.52	9.56	6.68	1.49	7.95
Nd	35.00	37.40	26.10	5.55	29.20
Sm	7.00	7.17	4.82	1.38	5.95
Eu	1.29	1.43	1.23	.75	1.15
Gd	6.89	6.86	4.60	1.09	5.78
Tb	1.03	1.06	0.71	0.16	0.90
Dy	5.62	5.66	3.36	0.75	4.55
Ho	1.14	1.12	0.66	0.12	0.92
Er	3.33	3.34	1.97	0.46	2.67
Tm	0.49	0.51	0.32	0.07	0.38
Yb	3.17	3.20	1.94	0.45	2.25
Lu	0.51	0.50	0.31	0.11	0.39
Rb	179	173	113	125	133
Ba	429	422	1152	1083	433
Sr	110	108	894	257	163
Ta	1.38	1.49	0.87	0.26	1.14
Nb	12.8	13.1	9.7	3.5	11.8
Hf	5.45	5.52	3.97	3.03	5.58
Zr	204	191	149	70	208
Y	29	29	17	3	24
U	2.50	2.64	0.92	0.73	1.56
Th	14.30	13.40	3.26	3.66	14.20
Pb	14	14	24	38	16
Se	16	15	16	1	11
Cr	126	116	274	18	77
Ni	41	42	93	4	32
Co	21	20	28	4	14

注: 主元素用XRF方法, 微量元素用ICP-MS方法, 由国家地质测试中心分析。

表 2 秦岭佛坪变质结晶岩系龙草坪黑云斜长片麻岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄分析结果
Table 2 SHRIMP U-Pb ages of zircons for the Longcaoping biotite-plagioclase-gneiss in the Fuping area

样号	²⁰⁶ Pb/ ^{10⁻²}	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	²³² Th/ ²³⁸ U	²⁰⁶ Pb*/10 ⁻⁶	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* ± (%)	²⁰⁷ Pb*/ ²³⁵ U ± (%)		²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U ± (%)		²⁰⁶ Pb*/ ²³⁸ U 年龄/Ma	²⁰⁷ Pb*/ ²⁰⁶ Pb* 年龄/Ma			
Q50-1.1	0.06	3739	155	0.04	102.0	0.05156	1.1	0.2261	2.1	0.03181	1.8	201.9	3.5	266	24
Q50-2.1	0.06	1709	167	0.10	204.0	0.07367	0.5	1.412	1.8	0.1390	1.8	839	14	1033	11
Q50-3.1	0.22	1532	31	0.02	79.2	0.06679	1.1	0.533	2.1	0.0601	1.8	376.0	6.5	831	23
Q50-4.1	0.32	602	430	0.74	62.1	0.0658	1.5	1.086	2.4	0.1197	1.8	729	12	800	32
Q50-5.1		1064	156	0.15	82.3	0.06533	0.8	0.811	2.0	0.0901	1.8	556.0	9.5	785	17
Q50-6.1	0.41	841	30	0.04	28.3	0.0585	3.7	0.314	4.1	0.03897	1.8	246.5	4.5	549	91
Q50-7.1	0.44	1034	55	0.06	31.2	0.0565	2.2	0.2722	2.9	0.03496	1.8	221.5	4.0	471	50
Q50-8.1	0.88	339	118	0.36	14.7	0.0571	6.0	0.394	6.3	0.05006	2.0	314.9	6.0	495	130
Q509.1	0.06	1335	1114	0.86	170.0	0.07148	0.6	1.461	1.9	0.1483	1.8	891	15	971	13
Q50-10.1	0.18	3760	148	0.04	113.0	0.05049	1.1	0.2431	2.1	0.03492	1.8	221.3	3.9	218	26
Q50-11.1	0.07	523	220	0.43	122.0	0.14937	0.6	5.60	2.0	0.2719	1.9	1550	26	2339	9
Q50-12.1	0.48	661	309	0.48	56.1	0.0658	1.7	0.892	2.5	0.0983	1.9	604	11	800	36
Q50-13.1	0.12	1297	27	0.02	44.2	0.06452	1.3	0.3522	2.3	0.03959	1.8	250.3	4.4	759	28
Q50-14.1	0.38	789	322	0.42	50.0	0.0549	2.3	0.557	2.9	0.0735	1.8	457.1	8.0	410	52
Q50-15.1	0.37	758	119	0.16	37.1	0.0564	2.2	0.440	2.8	0.0567	1.8	355.3	6.3	467	48
Q50-16.1	1.27	398	89	0.23	21.5	0.631	4.8	0.540	5.2	0.0621	1.9	388.2	7.3	711	100
Q50-17.1	0.05	1495	373	0.26	88.2	0.05421	1.0	0.513	2.1	0.0686	1.8	427.9	7.4	380	23
Q50-18.1	1.00	530	192	0.37	50.8	0.0645	3.1	0.984	3.6	0.1107	1.9	677	12	757	66
Q50-19.1	0.14	514	112	0.22	75.8	0.1434	0.6	3.386	1.9	0.1713	1.8	1019	17	2268	11
Q50-20.1	0.99	752	20	0.03	25.4	0.0697	3.3	0.374	3.7	0.03897	1.9	246.4	4.5	918	67
Q50-21.1	0.74	893	122	0.14	46.4	0.0777	1.7	0.643	2.5	0.0600	1.8	375.8	6.6	1140	34
Q50-22.1	0.87	532	283	0.55	32.5	0.0555	3.5	0.540	3.9	0.0705	1.8	439.3	7.8	433	77
Q50-23.1	0.50	356	235	0.68	37.0	0.0672	2.0	1.116	2.7	0.1205	1.8	733	13	843	42
Q50-24.1	0.31	5023	149	0.03	139.0	0.0506	1.3	0.2234	2.2	0.03201	1.8	203.1	3.5	224	30
Q50-26.1	0.29	1266	123	0.10	97.2	0.06478	1.1	0.795	3.9	0.0891	3.7	550	19	767	23
Q50-27.1	0.85	1037	85	0.09	53.1	0.0588	2.5	0.479	4.4	0.0591	3.7	370	13	559	55
Q50-28.1	0.73	862	302	0.36	51.5	0.0643	2.2	0.613	4.2	0.0691	3.7	431	15	753	45
Q50-29.1	0.62	879	6	0.01	24.7	0.0502	4.0	0.225	5.4	0.0325	3.7	206.2	7.5	206	92
Q50-30.1	0.24	2728	1031	0.39	179	0.05544	0.9	0.581	3.8	0.0761	3.6	473	17	430	21
Q50-31.1	0.62	5788	241	0.04	188	0.04798	1.4	0.2487	3.9	0.0376	3.7	237.9	8.6	98	33
Q50-31a.1	3.51	198	78	0.41	12.4	0.0565	15	0.551	15	0.0707	3.9	441	17	472	320
Q50-32.1	1.51	1050	102	0.10	40.0	0.0530	5.2	0.319	6.3	0.0437	3.7	275.8	9.9	328	120
Q50-33.1	2.47	137	57	0.43	7.69	0.0694	11	0.610	11	0.0638	3.9	399	15	910	220
Q50-34.1	0.14	6027	68	0.01	171	0.05035	1.0	0.2287	3.8	0.0330	3.6	209.0	7.5	211	24
Q50-35.1	0.50	1176	247	0.22	57.4	0.0550	2.4	0.428	4.4	0.0565	3.7	354	13	412	53
Q50-36.1	0.25	1339	707	0.55	221	0.07618	0.86	2.009	3.7	0.1912	3.6	1128	38	1100	17
Q50-37.1	0.73	996	29	0.03	34.9	0.0813	2.5	0.454	4.4	0.0405	3.7	256.2	9.2	1229	49
Q50-38.1	0.45	735	143	0.20	93.3	0.0873	1.2	1.771	3.8	0.1472	3.7	885	30	1367	23
Q50-39.1	0.42	2003	63	0.03	58.0	0.0490	4.1	0.227	5.5	0.0336	3.7	212.7	7.7	150	95
Q50-40.1	0.29	415	135	0.34	109	0.11987	0.7	5.02	3.7	0.306	3.7	1720	55	1941	13
Q50-41.1	1.43	324	267	0.85	17.4	0.0552	7.5	0.648	8.4	0.0615	3.8	385	14	418	170
Q50-42.1	0.11	818	350	0.44	258	0.1698	0.97	8.54	3.9	0.367	3.7	2015	65	2547	16
Q50-43.1	0.37	2165	27	0.01	57.4	0.0491	2.5	0.2080	4.4	0.0307	3.7	195.2	7.0	151	58
Q50-44.1	0.25	866	278	0.33	64.6	0.0687	1.5	0.821	4.0	0.0867	3.7	536	19	889	32
Q50-45.1	0.82	372	224	0.62	47.2	0.0636	3.0	1.284	4.8	0.1464	3.7	881	30	729	65
Q50-46.1	2.50	384	138	0.37	18.3	0.0451	9.6	0.337	10	0.0542	3.7	340	12	-50	230
Q50-47.1	0.83	1376	8	0.01	36.0	0.0491	3.4	0.205	5.0	0.0302	3.7	191.9	6.9	154	79
Q50-48.1	0.56	3099	13	0.00	93.8	0.0492	2.2	0.237	4.3	0.0350	3.6	221.9	8.0	156	51
Q50-49.1	1.35	263	84	0.33	19.2	0.0519	5.9	0.600	7.0	0.0839	3.7	519	18	281	140
Q50-50.1	0.20	1112	191	0.18	52.1	0.06070	1.6	0.456	4.0	0.0545	3.6	342	12	629	34
Q50-51.1	0.30	688	198	0.30	82.0	0.06906	1.1	1.317	3.8	0.1383	3.6	835	29	900	23
Q50-52.1	0.20	630	293	0.48	64.0	0.06256	1.3	1.062	3.9	0.1180	3.7	719	25	783	28
Q50-53.1	0.17	4571	86	0.02	164	0.05004	1.0	0.288	3.8	0.0418	3.6	263.8	9.4	197	23
Q50-54.1	0.56	1023	20	0.02	33.1	0.0502	3.3	0.259	4.9	0.0374	3.7	236.8	8.5	204	77
Q50-55.1	0.02	548	177	0.33	109	0.09276	0.62	2.95	3.7	0.2309	3.6	1339	44	1483	12

注: 误差 1σ; Pbc 和 Pb* 分别代表普通 Pb 和放射成因 Pb; 普通 Pb 用 ²⁰⁴Pb 校正; 分析方法见宋彪等^[7]; 仪器 SHRIMP-II; 由北京离子探针研究中心分析。

表 3 佛坪变质结晶岩系南沟黑云斜长片麻岩锆英石 SHRIMP U-Pb 年龄分析结果
Table 3 SHRIMP U-Pb ages of zircons for the Nagou biotite-plagioclasegneiss in the Fuping area

样号	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	U/ 10^{-6}	Th/ 10^{-6}	$^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{Pb}^*$ (%)	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{U}$ ± (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ ± (%)	$^{206}\text{Pb}^*/^{238}\text{U}$ 年龄/Ma	$^{207}\text{Pb}^*/^{235}\text{Pb}^*$ 年龄/Ma					
Q64-1.1	1.57	85	65	0.79	5.24	0.0472	9.2	0.462	9.5	0.0710	2.6	442	11	61	220
Q64-2.1	0.17	349	345	1.02	20.8	0.0561	2.1	0.536	3.1	0.0693	2.3	432.1	9.5	455	46
Q64-3.1	0.43	151	64	0.43	11.2	0.0561	3.2	0.662	3.9	0.0856	2.3	530	12	455	70
Q64-4.1	2.46	146	50	0.36	7.69	0.0417	16	0.344	17	0.0599	3.0	375	11	-246	410
Q64-5.1	0.01	761	333	0.45	87.4	0.06619	0.94	1.220	2.4	0.1337	2.2	809	17	812	20
Q64-6.1	0.12	838	51	0.06	50.3	0.05382	1.8	0.518	2.9	0.0697	2.2	434.6	9.4	363	41
Q64-6.2	--	258	234	0.94	13.1	0.0570	5.0	0.465	5.5	0.0592	2.4	370.6	8.6	491	110
Q64-7.1	0.52	92	128	1.44	12.6	0.0653	3.2	1.434	4.0	0.1593	2.4	953	21	784	68
Q64-8.1	0.07	1119	622	0.57	179	0.09851	0.71	2.525	2.3	0.1859	2.2	1099	22	1596	13
Q64-8.2	0.10	1073	138	0.13	100.0	0.08341	1.0	1.249	2.5	0.1086	2.2	665	14	1279	20
Q64-9.1	0.14	473	255	0.56	34.7	0.05653	1.6	0.664	2.7	0.0852	2.2	527	11	473	35
Q64-10.1	0.08	885	11	0.01	48.7	0.05449	1.2	0.481	2.6	0.0640	2.3	399.7	8.8	392	27
Q64-11.1	0.03	374	121	0.34	173	0.1930	1.2	14.15	2.6	0.539	2.2	2780	50	2745	20
Q64-12.1	0.29	205	62	0.31	15.1	0.0575	3.3	0.678	4.0	0.0855	2.4	529	12	510	72
Q64-13.1	0.82	388	330	0.88	24.7	0.0511	3.6	0.516	4.3	0.0733	2.3	456	10	245	84
Q64-14.1	0.25	468	131	0.29	27.1	0.0545	2.4	0.505	3.3	0.0672	2.3	419.4	9.2	391	54
Q64-15.1	0.18	425	188	0.46	49.6	0.0666	1.5	1.248	2.7	0.1358	2.2	821	17	826	32
Q64-16.1	1.79	134	112	0.86	8.90	0.0467	6.1	0.489	6.7	0.0758	2.7	471	12	36	150
Q64-17.1	0.07	871	285	0.34	147	0.08094	0.86	2.195	2.4	0.1966	2.2	1157	24	1220	17
Q64-18.1	0.30	364	119	0.34	25.7	0.0558	3.0	0.632	3.8	0.0821	2.3	509	11	445	67
Q64-19.1	0.21	420	197	0.49	26.7	0.0546	2.7	0.557	3.5	0.0740	2.3	460	10	397	60
Q64-20.1	0.10	484	326	0.70	109	0.12523	0.62	4.51	2.4	0.2613	2.4	1496	31	2032	11
Q64-21.1	1.21	40	42	1.09	4.55	0.0599	11	1.08	11	0.1313	2.7	795	20	599	240
Q64-22.1	0.19	363	176	0.50	23.6	0.0578	2.4	0.602	3.3	0.0755	2.3	469	10	523	52
Q64-23.1	0.01	147	134	0.94	8.99	0.0595	3.7	0.582	4.4	0.0710	2.5	442	11	584	80
Q64-24.1	0.63	138	68	0.51	9.32	0.0550	4.2	0.592	4.8	0.0780	2.4	484	11	414	94
Q64-24.2	0.08	2930	1349	0.48	122	0.05364	1.5	0.3568	2.7	0.0482	2.2	303.7	6.6	356	34
Q64-25.1	0.16	433	112	0.27	49.3	0.06307	1.5	1.152	2.7	0.1324	2.2	802	17	711	32
Q64-26.1	0.11	152	95	0.65	47.6	0.1192	0.95	6.00	2.5	0.3652	2.3	2007	40	1944	17
Q64-25.2	0.08	542	174	0.33	108	0.08443	0.82	2.707	2.7	0.2325	2.6	1348	32	1303	16
Q64-27.1	0.47	54	148	2.81	12.7	0.1319	5.5	4.95	6.0	0.2720	2.6	1551	35	2124	96
Q64-28.1	0.41	362	8	0.02	26.0	0.0548	3.5	0.627	4.2	0.0831	2.3	514	11	402	78
Q64-29.1	0.48	116	84	0.75	7.67	0.0521	5.8	0.550	6.2	0.0766	2.4	476	11	289	130

注: * 符号意义、实验方法、仪器、参数见表 2 说明。

MgO、Fe₂O₃+FeO、MnO、Cr、Ni 含量低(表 1)。它与其他样品似同一基性岩浆分异结晶产物。岩石的主、微量元素组成与南秦岭广泛发育的中酸性火山岩成分有相似之处^[4]。

3 SHRIMP 锆英石 U-Pb 年龄测定结果

Q50-1 锆英石采自佛坪县龙草坪的黑云斜长片麻岩大样分选。锆英石呈浅黄玫瑰色,无色,双锥柱状,多数锆英石晶棱圆化呈椭球状,长宽比 1:1~3:1。

由离子探针分析结果(表 2)和谐合图(图 3)可以看出,样品中锆英石十分复杂,由太古宇至显生宇都有锆英石分布。锆英石样品 Q50-11.1, Q50-19.1, Q50-42.1 不一致线上交点年龄为 2583 Ma 左右, Q50-38.1, Q50-42.1 连线上交点年龄近于 2012 Ma,并在 1200 Ma 左右, 800 Ma 左右, 400 Ma 左右, 200 Ma 左右大量锆英石 U-Pb 年龄形成峰期。

样品 Q64-1 锆英石由采自佛坪县南沟的黑云斜长片麻岩分选。锆英石与样品 Q50-1 类似,浅黄玫瑰色,无色,半透

明—透明双锥柱状,晶棱圆化,多数锆英石呈椭球状,长宽比 1:1~3:1。从离子探针分析结果(表 3)和谐合图(图 4)可看出,样品 Q50-1 与样品 Q64-1 类似,锆英石也是十分复杂的。分析的 29 颗锆英石中,除有老至 2 745 Ma 的锆英石外,也有大量形成于 2 000 Ma 左右和更晚期的锆英石存在, 800 Ma 左右, 400 Ma 左右具有年龄峰期。

4 全岩样品 Sm-Nd 年龄数据

对采自龙草坪—南沟和佛坪镇南的 30 个片麻岩和斜长角闪岩样品进行了 Sm-Nd 年龄同位素分析(表 4)。样品在 ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd—¹⁴⁷Nd/¹⁴⁴Nd 图上的分布见图 5, 样品不构成等时线。Nd 模式年龄 t_{DM} 由 1371~2081 Ma, 平均值 1774 Ma 左右。

5 讨论

5.1 佛坪变质结晶岩系的形成时代和物质组成特征

佛坪变质结晶岩系十分复杂,由上述选自佛坪穹隆核

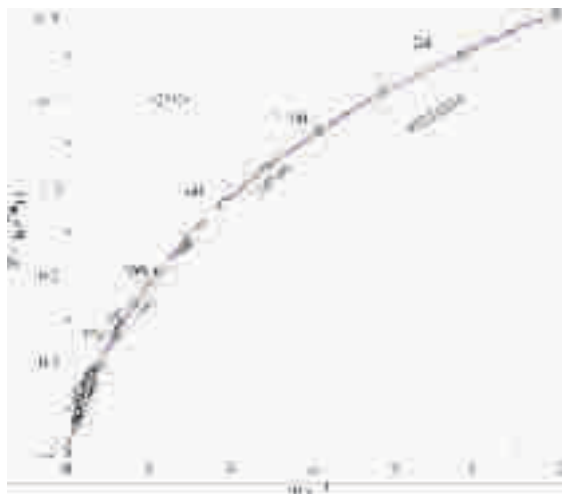


图 3 佛坪变质结晶岩系龙草坪黑云斜长片麻岩 SHRIMP 锆英石 U-Pb 年龄

Fig. 3 Zircon SHRIMP U-Pb ages of Longcaoping biotite-plagioclase gneiss in the Foping area

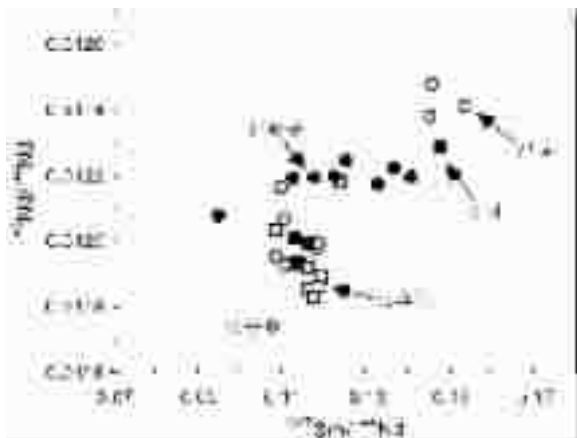


图 5 秦岭佛坪变质结晶岩系全岩样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 图

Fig. 5 Whole-rock $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ — $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ diagram for metamorphic crystalline rocks in the Foping area

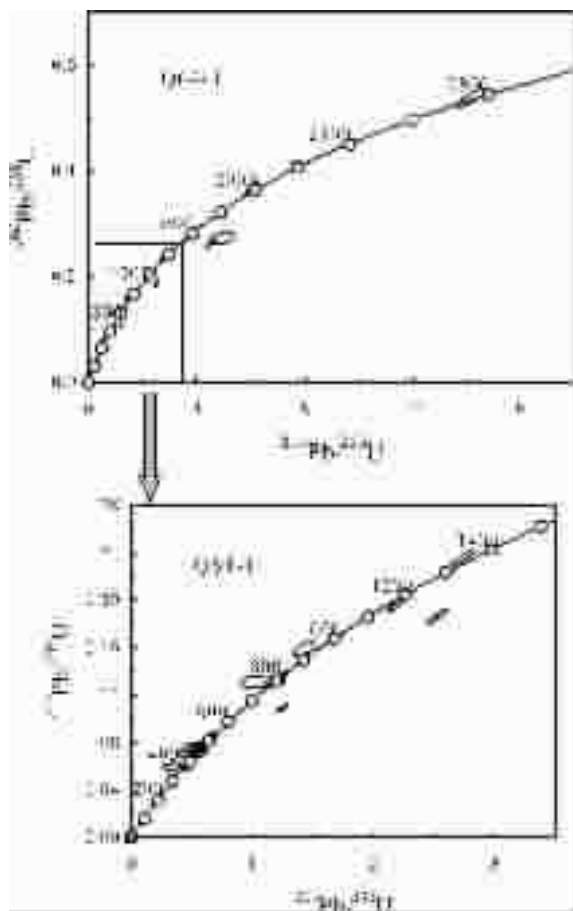


图 4 佛坪变质结晶岩系南沟黑云斜长片麻岩锆英石 SHRIMP U-Pb 年龄

Fig. 4 Zircon SHRIMP U-Pb ages of Nanguo biotite-plagioclase gneiss in the Foping area

部变质结晶岩系的锆英石 SHRIMP U-Pb 年龄结果和变质岩全岩样品的 Sm-Nd 年龄同位素结果不难看出其复杂性。锆英石 SHRIMP U-Pb 年龄,有 >2 500 Ma 形成于新太古代的锆英石,也有大量形成于 2 000 Ma 左右,1 200Ma 左右,800 Ma 左右,400 Ma 左右和 200 Ma 左右的锆英石 (图 6)。Sm-Nd 年龄同位素分析结果同锆英石 U-Pb 年龄一样,也十分分散。Nd 模式年龄 t_{DM} 由 1 371 Ma 至 2 081 Ma,并在 2 000—1 900 Ma 左右,1 600 Ma 左右形成多个峰期(图 7)。这显示,该套变质结晶岩系可能是不同时期来自地幔物质形成的杂岩。但总的来看,结晶岩系的主体可能形成于元古古代(2 000 Ma 左右)依据如下:

(1)地质上,变质结晶岩系覆于上元古界震旦系盖层之下^[1,3,5]。这表明,该变质结晶岩系主体应形成于 800 Ma 之前;(2)在变质结晶岩系中,虽有老至 2 500 Ma 的锆英石存在,但是数量很少。分析的 84 颗锆英石中,95.2%的锆英石的年龄 $\leq 2 000$ Ma。(3)变质结晶岩系全岩样品 Nd 模式年龄 t_{DM} 1 371~2 081 Ma,平均值 1 774 Ma。这表明,其变质岩原岩的形成年龄不会老于 2 081Ma(表 4,图 7)。Nd 模式年龄 t_{DM} 代表变质岩原岩物质由 MORB 亏损地幔源区分异时间,原岩形成年龄应小于或近似等于这个年龄值。结晶岩系中的极少量年龄 >2 500 Ma 的锆英石,可能是岩石形成时由老的地壳岩石中捕获的继承锆石。(4)变质结晶岩系锆石 SHRIMP U-Pb 年龄和全岩 Nd 模式年龄均显示佛坪地区遭受过多期强烈地质作用。锆英石 U-Pb 年龄数据在太古宇后形成 5 个峰期,即:2 000 Ma 左右,1 200 Ma 左右,800 Ma 左右,400 Ma 左右和 200 Ma 左右。在这些地质形成作用中,由 Nd 模式年龄统计频率图(图 7)不难看出,在结晶岩系中有地幔物质加入。但是岩石的主要组成部分物质形成于 2 100~1 800 Ma 左右的地幔。岩石主、微量元素组成具变质火山岩特征,而且不同 Nd 模式年龄岩石样品的稀土分布模式类似(表 1,表 4,图

表 4 佛坪变质结晶岩系全岩样品 Sm-Nd 年龄同位素分析结果

Table 4 Whole-rock Sm-Nd isotopic analytical results of metamorphic crystalline rocks in the Fuping area

样品号	岩石类型	采样地点	Sm($\mu\text{g/g}$)	Nd($\mu\text{g/g}$)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$\pm 2\sigma$	$t_{\text{DM}}(\text{Ma})$
Q50-1	黑云斜长片麻岩	龙草坪	5.992	31.091	0.1166	0.511854	9	2027
Q50-2	黑云斜长片麻岩	龙草坪	5.908	31.279	0.1142	0.511926	10	1869
Q51-1	黑云斜长片麻岩	龙草坪	5.502	27.906	0.1193	0.511892	8	2024
Q51-3	黑云斜长片麻岩	龙草坪	5.153	25.113	0.1241	0.512181	7	1644
Q51-4	黑云斜长片麻岩	龙草坪	8.313	42.416	0.1186	0.511865	9	2052
Q51-6	黑云斜长片麻岩	龙草坪	6.477	33.700	0.1162	0.511920	12	1916
Q51-8	黑云斜长片麻岩	龙草坪	2.332	12.992	0.1086	0.512039	12	1607
Q51-9	黑云斜长片麻岩	龙草坪	6.603	33.948	0.1176	0.511833	6	2081
Q52	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	4.855	26.061	0.1127	0.512194	9	1440
Q59-1	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	5.159	24.882	0.1254	0.512247	11	1586
Q59-5	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	4.986	24.571	0.1227	0.512198	10	1591
Q59-7	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	5.328	22.898	0.1408	0.512197	12	1998
Q59-8	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	9.107	40.264	0.1368	0.512226	6	1826
Q59-9	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	7.570	34.436	0.1330	0.512177	4	1832
Q59-10	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	1.668	10.624	0.9497×10^{-1}	0.512080	8	1371
Q59-11	黑云角闪斜长片麻岩	红岭桥	4.884	25.084	0.1178	0.512196	10	1513
Q62	黑云斜长片麻岩	温 泉	1.352	6.916	0.1182	0.511975	18	1906
Q63-1	黑云斜长片麻岩	温 泉	9.251×10^{-1}	5.064	0.1105	0.512068	8	1594
Q63-2	黑云斜长片麻岩	温 泉	8.012	44.121	0.1098	0.512166	11	1441
Q63-3	黑云斜长片麻岩	温 泉	4.046	16.784	0.1458	0.512478	11	1505
Q63-4	斜长角闪岩	温 泉	4.876	20.298	0.1452	0.512382	9	1707
Q63-5	斜长角闪岩	温 泉	3.871	19.688	0.1189	0.511996	20	1850
Q63-6	斜长角闪岩	温 泉	9.674	38.099	0.1536	0.512414	4	1861
Q63-7	黑云斜长片麻岩	温 泉	5.102	28.358	0.1088	0.511954	7	1825
Q63-8	黑云斜长片麻岩	温 泉	4.519	24.616	0.1110	0.511929	5	1807
Q64-1	黑云斜长片麻岩	南 沟	5.778	30.959	0.1129	0.512013	8	1715
Q64-2	黑云斜长片麻岩	南 沟	5.792	30.852	0.1136	0.511937	10	1842
Q64-4	黑云斜长片麻岩	南 沟	5.922	30.825	0.1162	0.511998	9	1796
Q64-5	黑云斜长片麻岩	南 沟	3.976	16.257	0.1479	0.512292	15	1981
Q65	石榴黑云斜长片麻岩	佛坪镇南	3.696	20.749	0.1078	0.511740	6	2022

注:分析方法见张宗清等^[4];Sm、Nd含量用同位素稀释法测定,质量分馏用 $^{147}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.72190$ 校正,流程空白Sm、Nd $\approx 10^{-11}\text{g}$ 。标准物质测定结果:J.M N₂O₃ $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.511125\pm 8(2\sigma)$;GBW4419 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}=0.512731\pm 8(2\sigma)$ 。 $t_{\text{DM}}=1/\lambda \text{Ln} \{ [(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_s - 0.51315] / [(^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd})_s - 0.2137] + 1 \}$,s代表样品值, λ 为 ^{147}Sm 衰变常数 0.00654Ga^{-1} 。

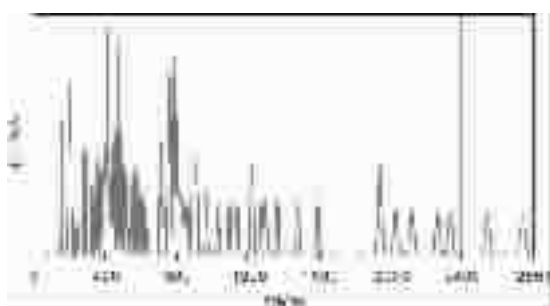


图 6 佛坪变质结晶岩系锆英石 SHRIMP U-Pb 年龄统计相对频率图

Fig. 6 Relative frequency diagram of zircon SHRIMP U-Pb ages for metamorphic crystalline rocks in the Foping area

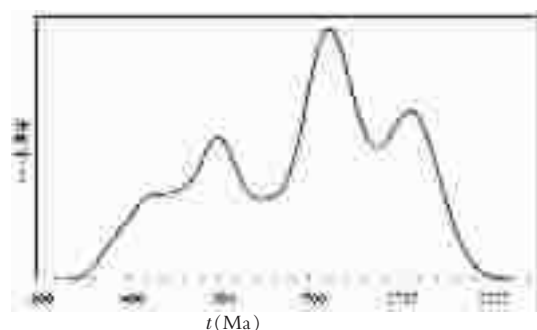


图 7 佛坪变质结晶岩系全岩 Nd 模式年龄统计相对频率图

Fig. 7 Relative frequency diagram of Nd model ages for metamorphic crystalline rocks in the Foping area

2)。这表明,在后期地质作用中,岩石遭受了变质改造,也有地幔物质不同程度加入到原有岩系中,但是加入的地幔物质的量不大。佛坪变质结晶岩系的主要组成部分可能是早元古代由来自类似 MORB 地幔岩浆形成的火山岩变质产物。

岩石的主、微量元素组成也不赞同岩石原岩形成于太古宇。太古宇 TTG 岩类稀土分布模式一般具有正 Eu 异常^[8,10,11]。由前面样品地球化学特征已经知道,该岩系样品 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值 0.5~1.3, 小于 1.6, 不属于 TTG 岩类,而且稀土分布模式具负 Eu 异常,与太古宇 TTG 岩类明显不同。

最后要补充说明的是,位于佛坪镇南穹隆核部原划佛坪岩群的石榴黑云斜长片麻岩的原岩可能与上述龙草坪片麻岩不同,属正常变质沉积岩。但是它的年龄与龙草坪片麻岩没什么差别。采自佛坪镇南穹隆核部石榴黑云斜长片麻岩样品 Q65 的 Nd 模式年龄为 2 022 Ma(表 4); 锆英石 U-Pb 不一致线上交点年龄为(2 283±162) Ma, 下交点年龄(271±15) Ma^[9]。

5.2 关于秦岭造山带的基底

秦岭造山带由中朝克拉通华北板块边缘, 扬子克拉通边缘和夹在其间的秦岭微板块组成^[9]。已获得的研究成果表

明, 秦岭微板块除造山带西南边缘有太古宙结晶基底外, 其余部分主要由元古代变质火山-沉积岩组成^[4,5,9]。佛坪变质结晶岩系中老于 2 500 Ma 锆英石的发现表明, 在秦岭造山带下部存在或曾经存在过太古宙结晶基底岩石。

6 结论

通过上述佛坪变质结晶岩系锆英石 SHRIMP U-Pb 年代学和全岩 Sm-Nd 年代学资料的讨论可以得出如下结论:

(1) 佛坪变质结晶岩系十分复杂, 其主体可能形成于元古代 2 000 Ma 左右。岩系形成太古宇的意见没有证实。在复杂地质作用地区, 锆英石十分复杂, 其年龄地质意义的确定需采用其他独立年代学方法数据限定。

(2) 在 1 200 Ma 左右, 800 Ma 左右, 400 Ma 左右, 200 Ma 左右佛坪变质结晶岩系遭受过强烈变质作用改造, 或部分重熔, 并有少量地幔物质不同程度加入。

(3) 商丹缝合带和勉略缝合带之间的秦岭造山带下部可能存在或存在过太古宙结晶基底岩石。在佛坪变质结晶岩系中存在年龄达 2 745 Ma 左右的锆英石。

参考文献 (References):

- [1] 陕西省地质矿产局. 陕西省区域地质志 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
Bureau of Geology and Mineral Resources of Shaanxi Province. Regional Geology of Shaanxi Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989 (in Chinese with extended English abstract).
- [2] 中国地质调查局. 1998 年全国区域地质调查工作总结 [J]. 中国区域地质, 1998, 18(2): 118.
China Geological Survey. Summary of nationwide regional geological survey in 1998 [J]. Regional Geology of China, 1998, 18 (2): 118 (in Chinese with English abstract).
- [3] 李海平. 陕西省佛坪发现太古宙结晶杂岩 [J]. 中国区域地质, 1998, 17(3): 329~330.
Li Haiping. Discovery of Archean crystal complex in the Foping, Shaanxi Province [J]. Regional Geology of China, 1998, 17 (3): 329~330 (in Chinese with English abstract).
- [4] 张宗清, 张国伟, 唐素寒. 南秦岭变质地层同位素年代学 [M]. 北京: 地质出版社, 2002.
Zhang Zongqing, Zhang Guowei, Tang Suohan. Isotopic Geochronology of Metamorphic Strata in the Southern Qinling Area [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张国伟, 张宗清, 董云鹏. 秦岭造山带主要构造岩石地层单元的构造性质及其地质构造意义 [J]. 岩石学报, 1995, 11(2): 101~114.
Zhang Guowei, Zhang Zongqing, Dong Yunpeng. Nature of main tectono-lithostratigraphic units of the Qinling orogen: implications for the tectonic evolution [J]. Acta Petrologica Sinica, 1995, 11 (2): 101~114 (in Chinese with English abstract).
- [6] 杨崇辉, 魏春景, 张寿广, 等. 南秦岭地区麻粒岩相岩石锆石 U-Pb 年龄 [J]. 地质论评, 1999, 45(2): 173~179.

- Yong Chonghui, Wei Chunjing, Zhang Shouguang, et al. U-Pb zircon dating of granulite facies rocks from the Foping area in the southern Qinling Mountains[J]. *Geol. Review*, 1999, 45 (2): 173~179 (in Chinese with English abstract).
- [7] 宋彪, 张玉海, 万渝生, 等. 锆石 SHRIMP 样品靶制作、年龄测定及有关现象讨论[J]. *地质论评*, 2002, 48(增刊): 26~30.
- Song Biao, Zhang Yuhai, Wan Yusheng, et al. Mount making and procedure of the SHRIMP dating[J]. *Geol. Review*, 2002, 48 (supp.): 26~30 (in Chinese with English abstract).
- [8] 沈其韩, 徐惠芬, 张宗清, 等. 中国早前寒武纪麻粒岩[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
- Shen Qihan, Xu Hui fen, Zhang Zongqing, et al. Early Precambrian Granulites of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1994 (in Chinese).
- [9] 秦克令, 邹湘华, 何世平, 等. 西秦岭鱼洞子群的建立和时代归属 [A]. 见: 刘国惠, 张寿广主编. 秦岭—大巴山地质论文集变质地质 (一)[C]. 北京: 北京科学技术出版社, 1990. 167~174.
- Qin Keling, Zou Xianghua, He Shiping, et al. Establishment of the Yudongzi Group and its age in the west Qinling [A]. In: Liu Guohui and Zhang Shouguang (eds.), *Geological memoirs of the Qinling-Daba Mountains (1) Metamorphic geology* [C]. Beijing: Beijing Sci. Tech. Publ. House, 1990. 167~174 (in Chinese).
- [10] Jahn B M, Zhang Z Q. Archaean granulite gneisses from eastern Hebei Province, China: Rare earth geochemistry and tectonic implications[J]. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1984, 85: 224~243.
- [11] Tarney J, Weaver B L. Geochemistry of the Scourian complex: petrogenesis and tectonic models [A]. In: Park R G and Tarney J (eds.), *Evolution of the Lewisian and Comparable Precambrian High Grade Terrain* [C]. Geological Society Special Publication, 1987, 27, 45~56.

Age and material composition of the Foping metamorphic crystalline complex in the Qinling Mountains : SHRIMP zircon U-Pb and whole-rock Sm-Nd geochronology

ZHANG Zongqing¹, SONG Biao¹, TANG Suohan¹, ZHANG Shouguang¹,
YANG Yongcheng², WANG Jinhui¹

(1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geosciences, Beijing 100037, China;*

2. *Shaanxi Institute of Regional Geology and Mineral Resources, Shaanxi Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xi'an 712000, Shaanxi, China*)

Abstract: The Qinling is a complex continental collisional orogenic belt resulting from long-continued, multi-stage development. This paper reports the results of isotopic analyses of the SHRIMP zircon U-Pb ages and whole-rock Sm-Nd ages for the Foping metamorphic crystalline complex in the central part of the orogenic belt. The SHRIMP zircon U-Pb ages are very complex; except for small amount of Archean zircon, there are also significant amounts of Proterozoic to Phanerozoic zircon. The metamorphic peaks occurred at -1 200, 800, 400 and 200 Ma. Gneiss has a Nd model age t_{DM} of 1 372-208 Ma. The main part of the Foping metamorphic crystalline rock series possibly formed in the Paleoproterozoic, with an age of -2 000 Ma. In the subsequent strong geological processes, a small amount of mantle material was introduced. The view of the formation of the rock series in the Neo-archean has not been verified by the authors. Archean crystalline basement rocks may occur or may have occurred in the central part of the Qinling orogenic belt.

Key words: Foping metamorphic crystalline complex; isotope chronology; Qinling orogenic belt