1000-0669/2000/016(01)-0049-58 *Acta Petrologica Sinica* 岩石学报

孔兹岩系——山西吕梁地区界河口群的年代学和地球化学*

万渝生[1] 耿元生[1] 沈其韩[1] 张如心[2]

1. 中国地质科学院地质研究所，北京 100037； 2. 山西省地勘局地质研究所，太原 030006.

1. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing* 100037;

2. *Institute of Geology, Bureau of Geology and Mineral Resources of Shanxi Province, Taiyuan* 030006

1999-05-18 收稿，1999-10-26 改回.

Wan Yusheng, Geng Yuansheng, Shen Qihan and Zhang Ruxin. 2000. Khondalite series — geochronology and geochemistry of the Jiehekou Group in Luliang area, Shanxi province. *Acta Petrologica Sinica*, 16(1):49～58

Abstract The Jiehekou Group is distributed in Luliang area, Shanxi Province, and composed mainly of meta-argillo-arenaceous rocks, marbles and small amounts of amphibolite. They underwent amphibolite-facies metamorphism. The meta-argillo-arenaceous rocks show large variations in major element compositions, but have similar REE patterns and trace element compositions, with TREE=151.9～322.3 μg/g, Eu/Eu^*=0.24～0.58, $(La/Yb)_n$=8.91～12.23, Ba/Ba^*=0.18～0.71. The rocks have Nd isotopic model age t_{DM} varying among 2.50 and 2.77 Ga. Metamorphosed detrital zircons from them yield two discordia with upper intercepts of 2.80±0.11 Ga and 2.03±0.05 Ga, respectively. Some main conclusions are as follows: (1) The Jiehekou Group, being of khondalite series properties, was likely formed in a tectonic environment of the passive continental margin of the North China Craton; (2) The Jiehekou Group was formed in the Early Proterozoic, rather than in the Neoarchaean or Mesoarchaean; (3) The source region, from which the argillo-arenaceous rocks of the Jiehekou Group were derived, was composed dominantly of Al and K-rich granitic or/and sedimentary rocks of Neoarchaean.

Key words Khondalite series, Geochemistry, Chronology, Nd isotope, Jiehekou Group

摘 要 吕梁地区界河口群主要由变泥砂质岩石和一定数量的大理岩及少量斜长角闪岩等类岩石组成。7个变泥砂质岩石样品分析，ΣREE=152～322 μg/g，Eu/Eu^*=0.24～0.58，$(La/Yb)_n$=8.9～12，Ba/Ba^*=0.18～0.71，Nd 同位素亏损地幔模式年龄 t_{DM}=2.50～2.77 Ga。变泥砂质岩石给出2.80±0.11 Ga 和2.03±0.05 Ga 两组（变质）碎屑锆石年龄数据。研究表明：界河口群具孔兹岩系的性质，形成于古元古代，而不是新太古代，更不是中太古代的地质产物。界河口群很可能形成于华北太古宙克拉通被动大陆边缘的构造环境，其源区物质主体由新太古代富铝富钾的花岗质岩石和/或碎屑沉积岩构成，但不排除少量中太古代物质参与的可能。

关键词 孔兹岩系；地球化学；年代学；Nd 同位素；界河口群

中图法分类号 P597.3

山西吕梁地区为我国华北克拉通早前寒武纪基底的重要组成，界河口群为区内重要岩石地层单位之一。经吴汾柱等(1993)①及其他地质工作者的长期努力，界河口群在空间分布、岩石组合、变质变形等方面已较为清楚。但在形成时代、形成环境及源区性质等方面仍存在较大争论。本文试图通过对其主要岩石类型，特别是变泥砂质岩石的年代学、地球化学及 Nd 同位素组成研究，为上述问题的解决作出贡献。

1 地质及岩相学

吴汾柱等(1993)的研究表明，原认为属于界河口群的许多片麻状岩石，实为遭受过强烈变质变形的花岗质侵入岩。把它们剔除后，界河口群主要由变泥砂质岩石和一定数量的

* 原地质矿产部重点地质科技项目成果(编号9501116)

第一作者简介：万渝生，男，1958年出生，博士，研究员，地球化学专业

① 吴汾柱，张如心，刘建华，杨文亮，梁英芳等. 1993. 山西省吕梁山中段内生矿产成矿规律及远景预测。(内部出版)，下同。

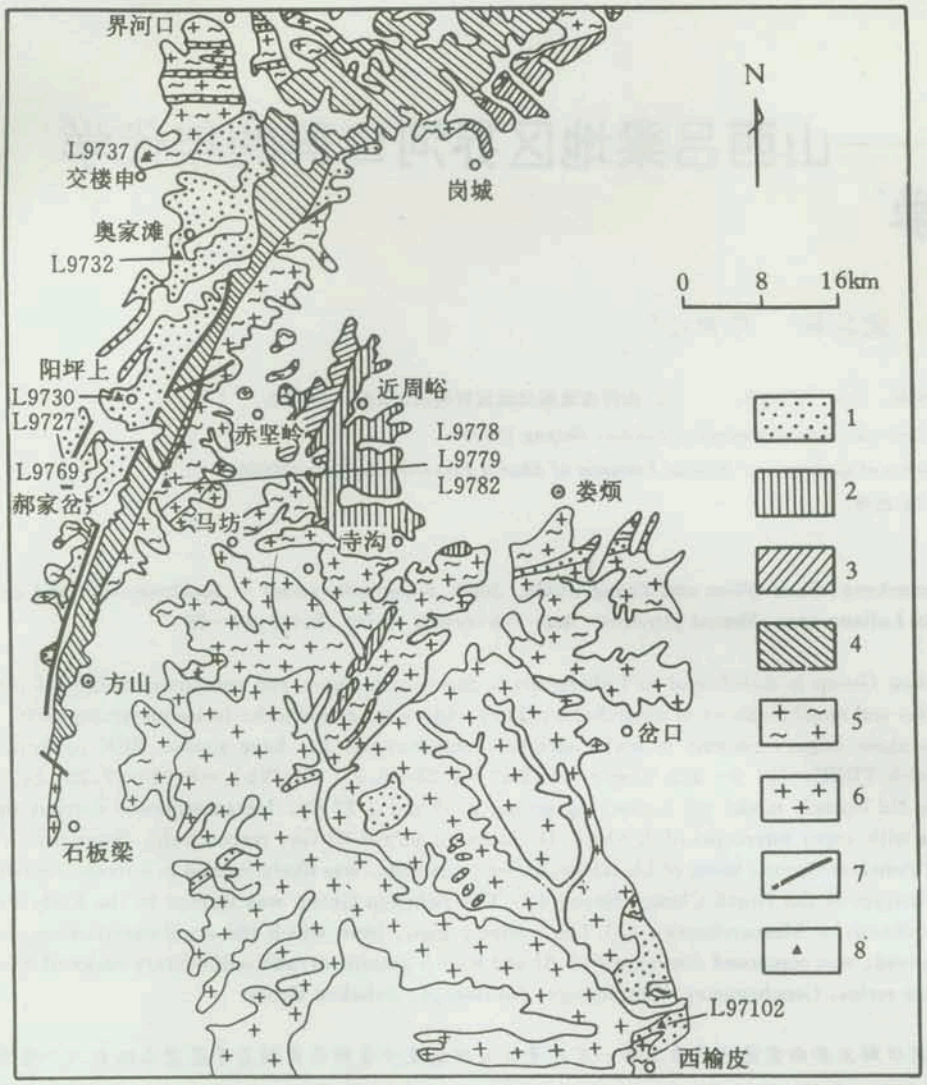


图1 山西吕梁地区地质简图(引自吴汾柱等(1993),略加修改和简化)

1-界河口群; 2-吕梁群; 3-岚河群; 4-野鸡山群; 5-早前寒武纪花岗质岩石; 6-吕梁期花岗岩(?); 7-断层; 8-样品位置。紧邻野鸡山群东侧大面积分布的花岗质岩石被山西地质工作者称为赤坚岭杂岩

Fig. 1 Geological sketch map of Luliang area, Shanxi province

大理岩组成,另有少量斜长角闪岩等存在。其主体呈近南北向分布于野鸡山群以西的界河口－郝家岔一带(图1)。被野鸡山群不整合覆盖,但接触关系常被断层破坏。野鸡山群以东的界河口群虽规模较小,但分布范围很大,从紧邻野鸡山群东侧的赤坚岭花岗质杂岩到西榆皮等地都有存在。

按矿物种类、含量及结构构造,界河口群变泥砂质岩石可进一步划分为白云母片岩、二云母片岩,白云石英片岩、黑云石英片岩、二云石英片岩、夕线石片岩、二云变粒岩－片麻岩(外貌上具变粒岩和片麻岩之间的过渡性质)、黑云变粒岩－片麻岩,石英岩等不同类型。以普遍含有云母类矿物为特征,富泥质岩石中云母含量最高可达70%以上。一些岩石中存在数量不等的石榴石,也见石墨。长英质矿物为石英、斜长石、钾长石,主要分布于变粒岩－片麻岩中,其比例存在较大变化。空间上,不同类型变泥砂质岩石以不同尺度互层产出(从几个厘米到数十米),其相互比例在不同地方可有较大变化。大理岩以厚层状或条带状产出,局部存在透辉石、透闪石等杂质矿物,向钙硅酸盐岩过渡。斜长角闪岩呈块状或条纹条带状构造,主要由斜长石、角闪石组成,也见绿帘石、石英、黑云母、石榴石等矿物。

根据矿物组合,界河口群变质程度最高已达角闪岩相。一些地方深熔现象清楚可见。在东南部西榆皮一带,界河口群变质岩石被未变质变形的吕梁期(?)花岗岩明显切割或以捕虏体形式存在。显然,界河口群的变质变形在吕梁期(?)花岗岩大规模侵入之前就已完成。

2.2 锆石 U-Pb 年龄测定

选择样品 L9732进行单颗粒锆石化学法 U-Pb 年龄测定,结果见表1和图3。

八组锆石样品的$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表面年龄十分接近,变化于1.85～2.18 Ga 之间。样品点大致按两条直线分布。点号4,5,7和8构成的直线(直线 I)上交点年龄为2.03±0.05 Ga。点号1,2,3,4,5和6构成的直线(直线 II)上交点年龄为2.80±0.11Ga。后者由于存在严重的 Pb 丢失,样品点远离上交点,误差较大,但仍给出了古老碎屑锆石存在的重要信息。不论是直线 I 或 II,都包括了短轴-近等轴状和长柱状两种不同类型的锆石。锆石的 U、Pb 含量与其形态无关。

表1 界河口群变泥砂质岩石(L9732)锆石 U-Pb 同位素组成

Table 1 U-Pb results for zircons separated from meta-argillo-arenaceous rock(L9732) of the Jiehekou Group

点号	锆石重量 (μg)	U (μg/g)	Pb (μg/g)	普通铅含量 (ng)	$^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值	$^{206}Pb/^{238}U$ 比值	$^{207}Pb/^{235}U$ 比值	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 比值	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表面年龄(Ma)
1	15	53	18	0.017	465	0.2787(41)	5.248(403)	0.1366(99)	2184
2	15	37	17	0.045	126	0.2753(26)	5.128(51)	0.1351(4)	2165
3	15	49	17	0.031	206	0.2530(24)	4.313(199)	0.1236(53)	2009
4	10	101	29	0.019	465	0.2431(28)	3.936(304)	0.1174(85)	1917
5	15	100	24	0.001	513890	0.2386(18)	3.827(173)	0.1163(49)	1901
6	10	69	22	0.029	192	0.2341(22)	3.644(159)	0.1129(46)	1847
7	10	147	50	0.033	423	0.2910(17)	4.852(72)	0.1209(16)	1970
8	10	140	55	0.030	604	0.3581(24)	6.139(158)	0.1243(30)	2019

注:1) 锆石特征:1-圆形无色透明,2-近等轴状浅黄色,3-长柱状浅黄色透明,4-长柱状浅紫色透明,5-近等轴状浅黄色,6-长柱状浅黄色透明,7-近等轴状浅紫色透明,8-近等轴状浅紫色半透明。2) 比值栏括号内数字为2σ 绝对误差,例如,0.2787(41)表示0.2787±0.0041(2σ)。3) 测定由原国土资源部天津地质矿产研究所完成。分析流程见周惠芳等(1993)。

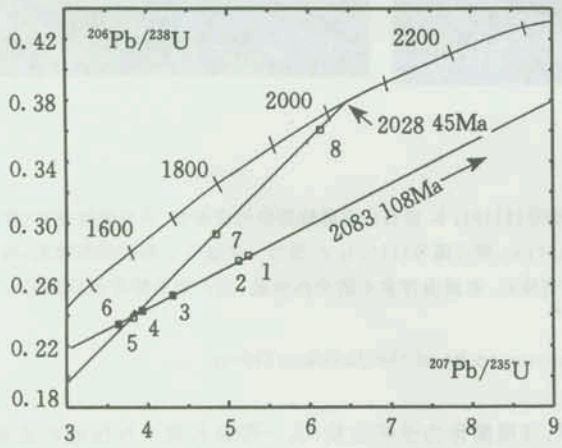


图3 界河口群变泥砂质岩(L9732)的锆石 U-Pb 谐和图

空心方框-近等轴状锆石;实心方框-长柱状锆石。由4,5,7,8点号构成的直线 I 上交点年龄为2028±45Ma,下交点年龄为407±221Ma。由1,2,3,4,5,6点号构成的直线 II 上交点年龄为2803±108Ma,下交点年龄为1109±60Ma

Fig. 3 Concordia diagram showing zircon U-Pb data for the meta-argillo-arenaceous rock (L9732) from the Jiehekou Group

3 地球化学

3.1 元素组成

界河口群变泥砂质岩石的常量元素组成存在较大变化。7个样品分析,SiO_2 和 Al_2O_3 分别为62.02%～79.49%和11.11%～19.42%,ΣFeO 和 MgO 分别为1.47%～5.84%和0.43%～1.90%(表2)。含云母和石榴石高的富泥质岩石,SiO_2,CaO 和 Na_2O 含量相对较低,Al_2O_3,ΣFeO 和 MgO 含量相对较高。含石英,斜长石和钾长石高的富砂质岩石则正好相反。岩石中 K_2O 含量普遍较高(1.59%～5.58%),但存在形式有所不同。在富泥质岩石中它们主要以云母类矿物形式存在,在富砂质岩石中则主要存在于钾长石中。样品L9782的 ΣFeO,MgO,CaO 含量都相对较高,与一定数量的角闪石存在有关。显然,常量元素组成极大地受造岩矿物种类和比例的制约。尽管常量元素组成存在很大变化,变泥砂质岩石稀土模式和某些微量元素的组成特征却十分类似(表2,图4)。岩石稀土总量较高(ΣREE=151.9～322.3μg/g),出现强的负铕异常(Eu/Eu^*=0.24～0.58)。除 L97102重稀土亏损,轻重稀土有较大分离外($(La/Yb)_n$= 28.2),其他样品重稀土呈平坦型,轻重稀土分离不强($(La/Yb)_n$=8.91～12.23)。在岩石/MORB－元素图上,元素 Nb、Ti 相对亏损,同时出现较强的负钡异常(Ba/Ba^*=0.18～0.71)。

2.2 锆石 U-Pb 年龄测定

选择样品 L9732进行单颗粒锆石化学法 U-Pb 年龄测定,结果见表1和图3。

八组锆石样品的$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表面年龄十分接近,变化于1.85～2.18 Ga 之间。样品点大致按两条直线分布。点号4,5,7和8构成的直线(直线 I)上交点年龄为2.03±0.05 Ga。点号1,2,3,4,5和6构成的直线(直线 II)上交点年龄为2.80±0.11Ga。后者由于存在严重的 Pb 丢失,样品点远离上交点,误差较大,但仍给出了古老碎屑锆石存在的重要信息。不论是直线 I 或 II,都包括了短轴-近等轴状和长柱状两种不同类型的锆石。锆石的 U、Pb 含量与其形态无关。

表1 界河口群变泥砂质岩石(L9732)锆石 U-Pb 同位素组成

Table 1 U-Pb results for zircons separated from meta-argillo-arenaceous rock(L9732) of the Jiehekou Group

点号	锆石重量 (μg)	U (μg/g)	Pb (μg/g)	普通铅含量 (ng)	$^{206}Pb/^{204}Pb$ 比值	$^{206}Pb/^{238}U$ 比值	$^{207}Pb/^{235}U$ 比值	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 比值	$^{207}Pb/^{206}Pb$ 表面年龄(Ma)
1	15	53	18	0.017	465	0.2787(41)	5.248(403)	0.1366(99)	2184
2	15	37	17	0.045	126	0.2753(26)	5.128(51)	0.1351(4)	2165
3	15	49	17	0.031	206	0.2530(24)	4.313(199)	0.1236(53)	2009
4	10	101	29	0.019	465	0.2431(28)	3.936(304)	0.1174(85)	1917
5	15	100	24	0.001	513890	0.2386(18)	3.827(173)	0.1163(49)	1901
6	10	69	22	0.029	192	0.2341(22)	3.644(159)	0.1129(46)	1847
7	10	147	50	0.033	423	0.2910(17)	4.852(72)	0.1209(16)	1970
8	10	140	55	0.030	604	0.3581(24)	6.139(158)	0.1243(30)	2019

注:1) 锆石特征:1-圆形无色透明,2-近等轴状浅黄色,3-长柱状浅黄色透明,4-长柱状浅紫色透明,5-近等轴状浅黄色,6-长柱状浅黄色透明,7-近等轴状浅紫色透明,8-近等轴状浅紫色半透明。2) 比值栏括号内数字为2σ绝对误差,例如,0.2787(41)表示0.2787±0.0041(2σ)。3) 测定由原国土资源部天津地质矿产研究所完成。分析流程见周惠芳等(1993)。

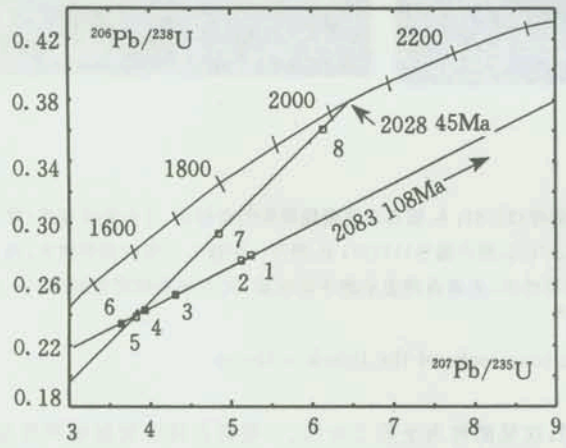


图3 界河口群变泥砂质岩(L9732)的锆石 U-Pb 谐和图

空心方框-近等轴状锆石;实心方框-长柱状锆石。由4,5,7,8点号构成的直线 I 上交点年龄为2028±45Ma,下交点年龄为407±221Ma。由1,2,3,4,5,6点号构成的直线 II 上交点年龄为2803±108Ma,下交点年龄为1109±60Ma

Fig. 3 Concordia diagram showing zircon U-Pb data for the meta-argillo-arenaceous rock (L9732) from the Jiehekou Group

3 地球化学

3.1 元素组成

界河口群变泥砂质岩石的常量元素组成存在较大变化。7个样品分析,SiO_2 和 Al_2O_3 分别为62.02%～79.49%和11.11%～19.42%,ΣFeO 和 MgO 分别为1.47%～5.84%和0.43%～1.90%(表2)。含云母和石榴石高的富泥质岩石,SiO_2,CaO 和 Na_2O 含量相对较低,Al_2O_3,ΣFeO 和 MgO 含量相对较高。含石英,斜长石和钾长石高的富砂质岩石则正好相反。岩石中 K_2O 含量普遍较高(1.59%～5.58%),但存在形式有所不同。在富泥质岩石中它们主要以云母类矿物形式存在,在富砂质岩石中则主要存在于钾长石中。样品L9782的 ΣFeO,MgO,CaO 含量都相对较高,与一定数量的角闪石存在有关。显然,常量元素组成极大地受造岩矿物种类和比例的制约。尽管常量元素组成存在很大变化,变泥砂质岩石稀土模式和某些微量元素的组成特征却十分类似(表2,图4)。岩石稀土总量较高(ΣREE=151.9～322.3μg/g),出现强的负铕异常(Eu/Eu^*=0.24～0.58)。除 L97102重稀土亏损,轻重稀土有较大分离外($(La/Yb)_n$= 28.2),其他样品重稀土呈平坦型,轻重稀土分离不强($(La/Yb)_n$=8.91～12.23)。在岩石/MORB－元素图上,元素 Nb、Ti 相对亏损,同时出现较强的负钡异常(Ba/Ba^*=0.18～0.71)。

表2 吕梁地区早前寒武纪变质岩石的元素组成

Table 2 Major and trace element compositions of metamorphic rocks from the Jiehekou Group in Luliang area

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
样号	L9727	L9732	L9769	L9778	L9779	L9782	L97102	L9730	L9737
SiO_2	62.02	79.47	67.05	72.82	73.21	65.72	73.52	51.04	50.32
TiO_2	0.59	0.41	0.55	0.29	0.35	0.64	0.18	1.40	1.13
Al_2O_3	19.42	11.11	16.47	13.54	13.92	14.38	13.77	13.82	14.74
Fe_2O_3	1.85	0.80	2.64	1.25	1.18	2.27	0.26	1.86	4.03
FeO	4.17	1.47	2.78	1.35	1.17	3.16	1.24	9.70	7.99
MnO	0.05	0.02	0.04	0.03	0.03	0.10	0.12	0.18	0.19
MgO	1.90	0.49	1.61	0.43	0.79	1.14	0.43	7.24	6.12
CaO	0.86	0.83	0.28	0.35	0.32	2.52	1.32	10.12	9.98
Na_2O	1.14	3.41	0.26	2.75	1.61	3.38	2.74	2.72	2.80
K_2O	4.40	1.59	4.41	6.90	5.94	5.02	5.58	0.47	1.04
P_2O_5	0.10	0.06	0.08	0.03	0.04	0.18	0.07	0.13	0.16
H_2O	3.16	0.90	3.40	0.38	1.58	0.96	0.38	1.60	1.42
CO_2	0.14	0.14	0.09	0.18	0.07	0.35	0.11	0.18	0.59
Total	100.0	102.0	99.4	100.7	100.4	100.6	100.3	102.5	102.1
Cr	82	42	73	12	11	22	18	132	115
Sc	13	4	11	4	6	9	2	29	31
Rb	120	90	214	236	264	194	209	12	7
Ba	715	377	601	675	517	1500	884	71	100
Sr	114	208	25	69	47	238	150	187	193
Nb	10.0	12.0	12.0	32.0	30.0	22.0	6.0	7.0	6.0
Zr	41	132	28	135	250	84	19	14	17
Y	27	19	24	43	49	38	11	21	23
Th	15	20	20	24	31	23	28	2	2
La	52.67	36.03	41.55	74.00	75.48	60.98	38.47	4.97	13.69
Ce	90.29	63.39	70.79	130.80	135.40	108.40	67.68	11.45	24.72
Pr	9.89	6.93	7.78	14.03	14.53	12.11	7.29	1.51	2.82
Nd	36.60	25.46	29.69	49.84	52.48	44.19	25.18	8.85	13.97
Sm	7.62	5.45	6.28	10.39	11.07	9.42	5.26	2.81	3.83
Eu	1.33	0.97	1.08	0.85	0.82	1.70	0.76	1.21	1.38
Gd	6.55	4.61	5.63	8.53	9.15	8.45	3.77	3.76	4.63
Tb	0.99	0.74	0.78	1.39	1.55	1.27	0.52	0.60	0.79
Dy	4.71	3.30	4.13	7.31	8.02	6.49	2.10	3.77	3.95
Ho	0.98	0.67	0.86	1.55	1.76	1.37	0.38	0.80	0.85
Er	2.83	1.81	2.30	4.42	5.17	3.83	0.86	2.23	2.47
Tm	0.43	0.28	0.36	0.66	0.76	0.56	0.13	0.32	0.36
Yb	2.94	1.94	2.40	4.51	5.25	3.77	0.90	1.97	2.31
Lu	0.46	0.29	0.32	0.70	0.87	0.60	0.13	0.30	0.38
TREE	218.3	151.9	174.0	309.0	322.3	263.1	153.4	44.6	76.1
$(La/Yb)_n$	11.80	12.23	11.40	10.81	9.47	10.66	28.16	1.66	3.90
Eu/Eu*	0.57	0.58	0.55	0.27	0.24	0.58	0.50	1.15	1.01
$(Ba/Rb)_n$	0.60	0.42	0.28	0.29	0.20	0.77	0.42	0.59	1.42
Ba/Ba*	0.53	0.26	0.29	0.28	0.18	0.71	0.36	0.44	0.74

注：1）样品名称及采样位置：1-石榴白云片岩，兴县阳坪上东；2-二云变粒岩，兴县奥家滩南；3-白云石英片岩，临县郝家岔；4-二云变粒岩-片麻岩，方山马坊北西；5-二云变粒岩-片麻岩，方山马坊北西；6-角闪黑云片麻岩，方山马坊北西；4～6以残余包体形式存在于赤坚岭花岗质杂岩中。7-含榴黑云变粒岩（片麻岩，交城西榆皮北；8-斜长角闪岩，兴县阳坪上；9-斜长角闪岩，交楼申北。2）常量和微量元素用 x 荧光法测定，稀土元素用等离子光谱法测定，测定由国家地质实验测试中心完成。3）常量元素单位为%，稀土和微量元素单位为 μg/g。4）Zr 含量普遍偏低，很可能与测试有关，列于表中仅作参考。5）Ba/Ba* 为钡异常，$(Ba/Rb)_n=(Ba_s/Ba_m)/(Rb_s/Rb_m)$，$Ba/Ba^*=2\times(Ba_s/Ba_m)/(Rb_s/Rb_m+Th_s/Th_m)$。式中右端下标 s 代表样品，m 代表洋中脊亏损型拉斑玄武岩。Rb_m、Ba_m 和 Th_m 分别为2、20和0.2μg/g（Wan，1999）。

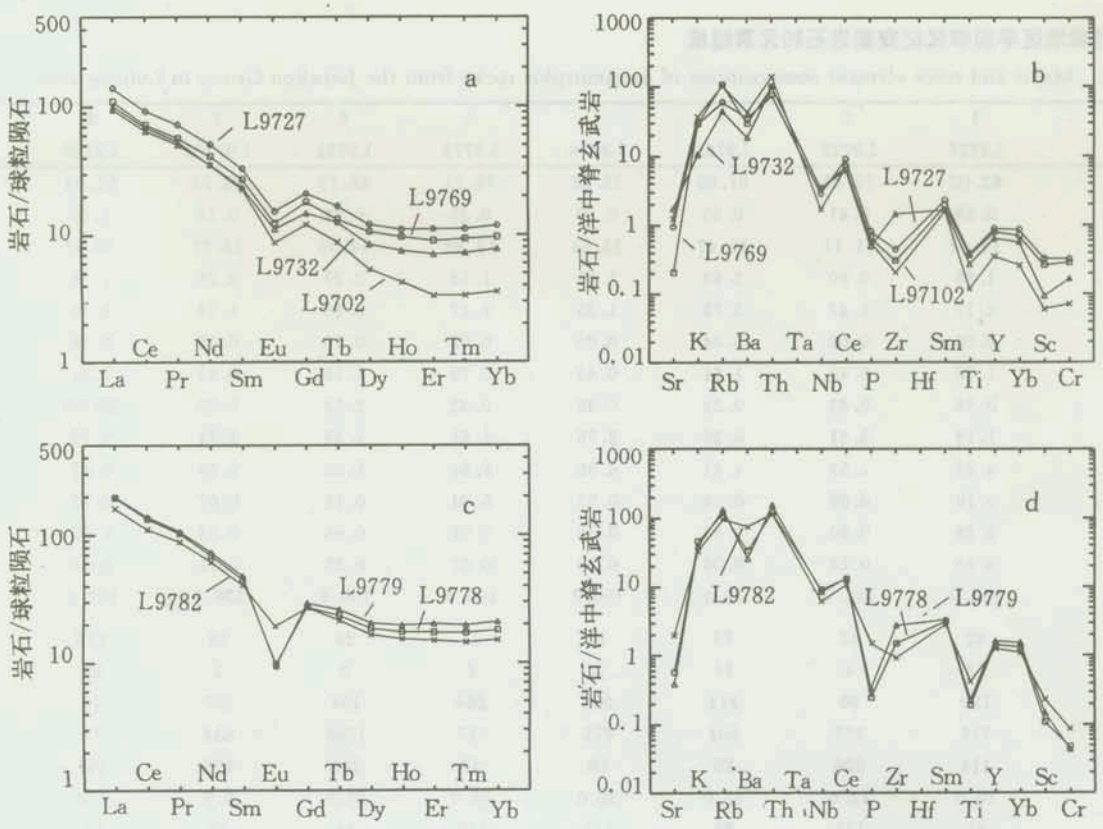


图4 界河口群变泥砂质岩石的地球化学图解

a 和 c-稀土模式；b 和 d-岩石/MORB-元素图解

Fig. 4 Geochemical diagrams of meta-argillo-arenaceous rocks from the Jiehekou Group

对界河口群两个斜长角闪岩样品(L9730,L9737)也进行了元素分析。岩石相对高 ΣFeO 低 MgO(表2)，在 AFM 图上位于拉班玄武岩区(图5a)。其中样品 L9737轻稀土和 K_2O 明显富集，看来与陆壳物质加入有关。样品 L9730具近于平坦型的稀土模式(图5b)，更可能反映了玄武质岩浆本身的组成特征。

表3 吕梁地区界河口群变质岩石的 Sm、Nd 同位素组成及计算参数

Table 3 Sm-Nd isotopic compositions and calculated parameters of the metamorphic rocks from the Jiehekou Group in Luliang area

样品号	Sm	Nd	$^{147}Sm/^{144}Nd$	$^{143}Nd/^{144}Nd$	2σ	$f_{Sm/Nd}$	t_{CHUR}	t_{DM}	$\varepsilon_{Nd}(2.7)$	$\varepsilon_{Nd}(2.2)$	$\varepsilon_{Nd}(0)$
L9727	6.26	34.38	0.1100	0.511352	5	−0.441	2.25	2.63	5.21	−0.59	−25.09
L9732	5.18	28.93	0.1082	0.511380	7	−0.450	2.16	2.54	6.42	0.49	−24.54
L9769	6.28	34.89	0.1088	0.511422	7	−0.447	2.10	2.50	7.05	1.16	−23.72
L9778	9.47	54.57	0.1049	0.511288	6	−0.467	2.23	2.59	5.75	−0.39	−26.33
L9779	9.68	57.71	0.1015	0.511163	6	−0.484	2.35	2.68	4.45	−1.91	−28.77
L9782	8.73	47.16	0.1119	0.511399	11	−0.431	2.22	2.61	5.47	−0.20	−24.17
L97102	4.71	26.21	0.1087	0.511228	8	−0.447	2.43	2.77	3.18	−2.70	−27.50

注：1. Sm、Nd 同位素分析流程见张宗清等(1987)，测定由中国地质科学院地质研究所完成；2. Sm 和 Nd 含量单位为 μg/g；

3. 模式年龄和 ε_{Nd} 值计算年龄单位为 Ga；4. 模式年龄计算：$t_{DM}=(1/\lambda)\ln\{[(^{143}Nd/^{144}Nd)-0.51315]/[(^{147}Sm/^{144}Nd)-0.2137]+1\}$

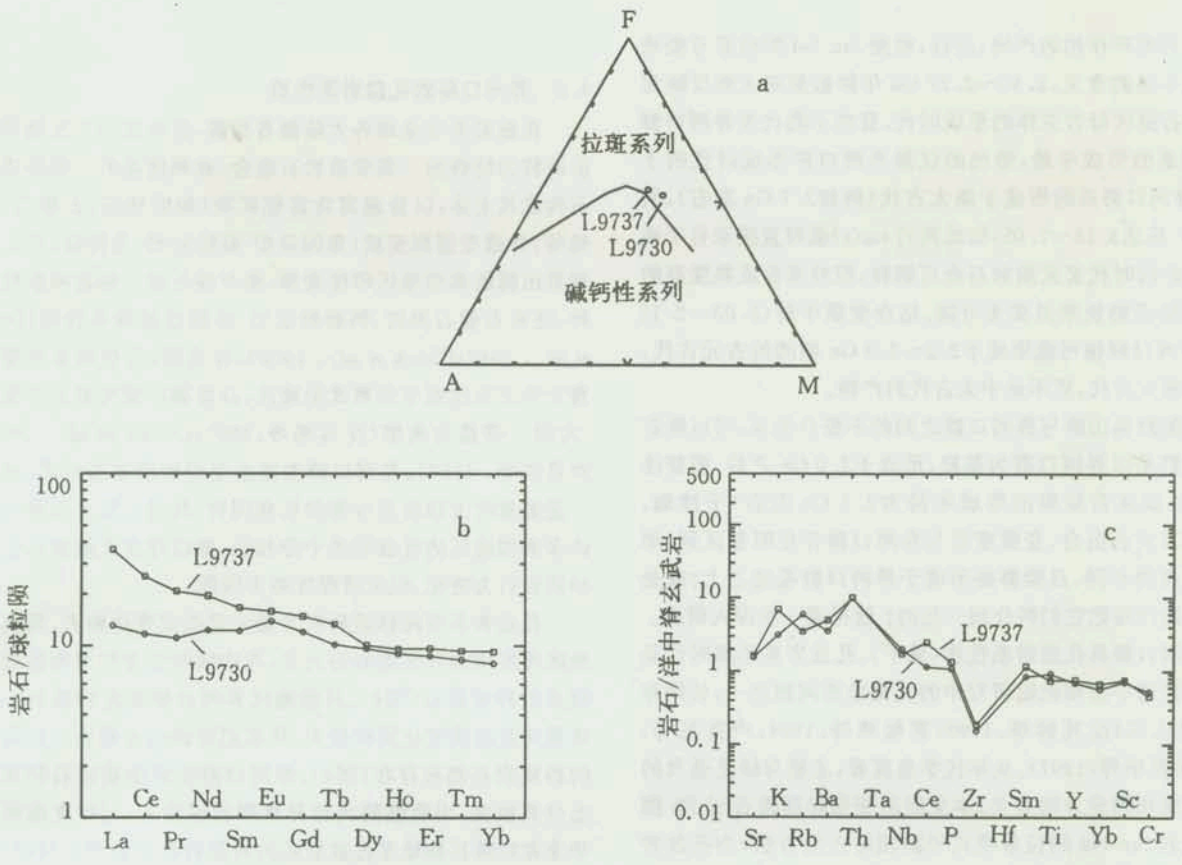


图5 界河口群斜长角闪岩的地球化学图解

a-AFM 图；b-稀土模式；c-岩石/MORB-元素图解

Fig. 5 Geochemical diagrams of amphibolites from the Jiehekou Group

3.2 Nd 同位素组成

界河口群变泥砂质岩石 Sm、Nd 同位素组成十分均匀。七个样品分析，$^{147}Sm/^{144}Nd$ 和 $^{143}Nd/^{144}Nd$ 分别为0.1015～0.1119和0.511163～0.511422，$f_{Sm/Nd}$为－0.431～－0.484，t_{CHUR}和t_{DM}分别为2.10～2.43 Ga 和2.50～2.77 Ga，$\varepsilon_{Nd}(2.2)$和 $\varepsilon_{Nd}(2.7)$分别为－2.70～1.16和3.18～7.05。样品间不存在良好的线性关系。

4 讨论

4.1 界河口群的形成时代

由于缺乏适当的测年对象及研究程度较低等原因，界河口群形成时代一直未得到很好解决。虽被年青的野鸡山群不整合覆盖，但由于本身时代不清则难以作出进一步推断。根据岩石组合、变质变形及区域对比，通常认为界河口群形成于太古宙，并有中太古代和新太古代两种不同的认识。

本次研究对变泥砂质岩石(L9732)中的变质碎屑锆石进行了 U-Pb 同位素测定，获得两条不一致线，上交点年龄分别为2.03±0.05 Ga(直线 I)和2.80±0.11 Ga(直线 II)(图3)。后一年龄误差很大，但2.80 Ga 的年龄数据仍反映了源区母岩古老碎屑锆石存在的重要信息。直线 I 上交点年龄为2.03±0.05 Ga，其中点号8接近于上交点，起了重要的控制作用。该年龄显然为吕梁期构造热事件记录，而不代表界河口群的形成时代。与该期变质变形有关的深熔作用所形成的花岗质岩石，测得两组2.15 Ga 左右的锆石 U-Pb 年龄(耿元生等，未发表资料)。可把该期热事件时间定在2.03～2.15 Ga 之间。

泥砂质岩石 Nd 同位素组成不但可很好地反映源区物质的组成特征(Nelson *et al.*, 1988; Chen *et al.*, 1990)，一定条件下，还可为时代确定起到重要作用。界河口群变泥砂质岩石 t_{DM} 模式年龄变化很小，为2.50～2.77Ga，平均值为2.62 Ga。界河口群遭受变质变形叠加改造，但引起稀土发生明显迁移的蚀变作用不强。所分析样品都十分的新鲜，排除了外生风化的强烈影响。同时，界河口群变玄武质岩石很少，其稀土总量很低，同时代地幔物质大量加入的可能性也可排除。界河口群泥砂质岩石具高的成熟度，是经历过搬运沉积

等壳内再循环作用的产物。所以，根据 Sm-Nd 同位素亏损地幔模式年龄的含义，2.50～2.77 Ga 年龄数据应大致反映泥砂质岩石源区母岩主体的形成时代，显然不能代表界河口群孔兹岩系的形成年龄，给出的仅是界河口群形成时代的下限。若界河口群真的形成于新太古代(例如2.7 Ga 左右)，其 $\varepsilon_{Nd}(2.7)$高达3.18～7.05，如此高的 $\varepsilon_{Nd}(t)$值对直接来自于地幔源区的同时代玄武质岩石尚可解释，但对来自成熟度高的更早期陆壳物质来说实无可能。结合变质年龄(2.03～2.15 Ga)，界河口群很可能形成于2.2～2.3 Ga 期间的古元古代，而不是新太古代，更不是中太古代的产物。

根据野鸡山群与界河口群之间的不整合关系，可以断定野鸡山群是以界河口群为基底，形成于2.0 Ga 之后。需要注意的是，该区吕梁群的形成年龄为2.1 Ga 左右(于津海，1997)，其岩石组合、变质变形与界河口群存在明显区别，形成环境显然不同。吕梁群是形成于界河口群基底之上?或是后期构造作用把它们拼合到一起的？值得进一步深入研究。

界河口群具孔兹岩系性质(见下)。孔兹岩系形成时代是华北克拉通早前寒武纪研究中的关键地质问题之一，长期存在不同认识(沈其韩等，1990；郭敬辉等，1994；卢良兆等，1996；吴昌华等，1997)。从年代学角度看，主要与缺乏适当的测定对象和测定方法有关。本文应用变质碎屑锆石 U-Pb 测年和全岩 Sm-Nd 同位素模式年龄相结合的方法，为孔兹岩系形成时代研究作出了有益的尝试。

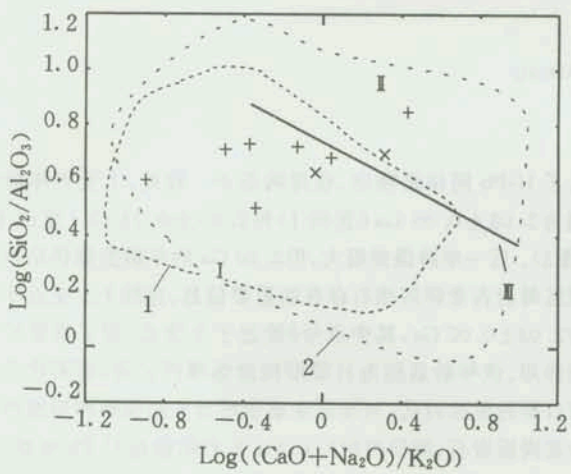


图 6 孔兹岩系变泥砂质岩石的 $Log((CaO+Na_2O)/K_2O)-Log(SiO_2/Al_2O_3)$图解

1-印度南部孔兹岩系变泥砂质岩石分布范围(Dash *et al.*, 1987)；2-中国华北克拉通及邻区孔兹岩系变泥砂质岩石分布范围(数据来源见万渝生等(2000)①)；十字-吕梁地区界河口群变泥砂质岩石；I-页岩分布区；II-砂岩分布区；III-中酸性岩浆岩分布趋势(见 Condie *et al.*, 1992)

Fig. 6 $Log((CaO+Na_2O)/K_2O)-Log(SiO_2/Al_2O_3)$ diagram of meta-argillo-arenaceous rocks of khondalite series

4.2 界河口群的孔兹岩系性质

孔兹岩系在全球各大陆都有出露，是地质历史发展早期阶段较为特殊的一类变质岩石组合。成熟度高的变泥砂质岩石构成其主体，以普遍富含富铝矿物(如矽线石，石榴石，云母等)并遭受强烈变质(角闪岩相-麻粒岩相)为特征。在孔兹岩系出露的典型地区印度南部，除夕线石榴片麻岩和麻粒岩外，还有石榴石英岩、钙硅酸盐岩、碳酸盐岩等类岩石(Dash *et al.*, 1987；Chack *et al.*, 1992)。在我国，孔兹岩系主要发育于华北克拉通早前寒武纪地区，以晋冀内蒙交界地区集宁-大同一带最为典型(沈其韩等，1990；Condie *et al.*, 1992；卢良兆等，1996)。界河口群主要由变泥砂质岩石组成，另有一定数量的大理岩及少量斜长角闪岩。其岩石组合与国内外许多典型地区的孔兹岩系十分相似，都以存在大量富铝变泥砂质岩石为特征。但变质程度略为偏低。

孔兹岩系变泥砂质岩石常量元素组成变化较大。其典型地区印度南部以泥质岩石为主，在中国华北克拉通则出现了较多的砂质岩石(图6)。吕梁地区界河口群变泥砂质岩石的常量元素组成变化同样较大，从富铝富钾的泥质岩石到富硅的砂质岩石都有存在(图6)。界河口群变泥砂质岩石轻重稀土分离较低，出现强的负铕异常和负钡异常，与印度南部和华北克拉通其他地区孔兹岩系的同类岩石完全可以对比(图7)，显示了它们成因上的类似性。

不难看出，界河口群不论岩石组合或变泥砂质岩石的地球化学组成，其总体特征与国内外典型地区孔兹岩系十分类似。可把界河口群作为孔兹岩系看待。

4.3 物质来源及形成环境

界河口群不同类型变泥砂质岩石空间上紧密共生，相互过渡，互层产出。这种现象在其他孔兹岩系出露的典型地区常可见到(Dash *et al.*, 1987；卢良兆等，1996)。虽受后期变质变形强烈改造，这种互层性质在很大程度上仍反映了原有的沉积特征。泥砂质岩石常量元素组成的变化趋势与中酸性岩浆岩明显不同(图6)。由于不同类型泥砂质岩石的稀土和微量元素组成十分类似，常量元素组成上大的变化看来主要与沉积过程中强烈外生分异作用有关，并非表明了它们物源区的不同。根据泥砂质岩石常量元素组成特征，其源区物质总体上具有高 Al_2O_3、K_2O、低 CaO、Na_2O 的性质。

细粒沉积物的微量元素，特别是稀土组成在很大程度上反映了源区岩石的组成特征(Taylor *et al.*, 1985)。界河口群不同类型泥砂质岩石稀土模式十分类似，轻重稀土分离较弱，重稀土部分呈平坦型，出现强的负铕异常。在岩石/MORB-元素图上，Ba 及 Nb、P、Ti 存在明显的相对亏损。其总体特征与太古宙晚期富钾富铝的花岗质岩石(Sylvester,

① 万渝生等，2000，中国华北克拉通及邻区孔兹岩系的地球化学组成特征(待刊)

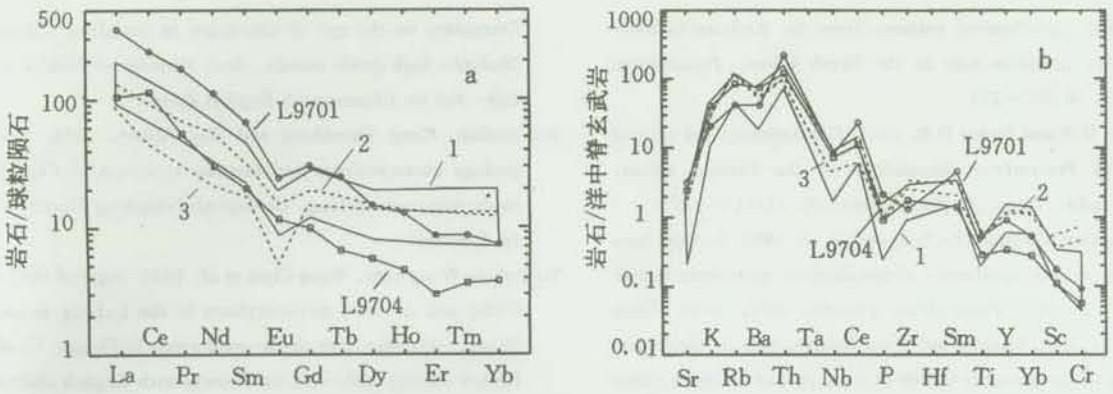


图7　变泥砂质岩石的稀土模式(a)和岩石/MORB—元素图解(b)

1-吕梁地区界河口群变泥砂质岩石分布范围(除去样品 L97102,图 b 中元素 Zr 位置作了适当调整)；2-中国华北克拉通及邻区孔兹岩系变泥砂质岩石平均值(数据来源见万渝生等(2000))；3-印度南部孔兹岩系变泥砂质岩石平均值(Chack *et al.*, 1992)

Fig. 7　REE patterns and rock/MORB-element diagrams of meta-argillo-arenaceous rocks

1994；伍家善等，1998)十分类似，而与 TTG 花岗质岩石(Martin，1994；伍家善等，1998)存在很大区别。显然，成熟度高的富铝富钾花岗质岩石和/或碎屑沉积岩构成了源区物质的重要组成。

岩石 Nd 同位素组成十分均匀，进一步支持了它们来自同一源区，搬运沉积作用过程中不同组成物质发生充分混合的认识。若泥砂质岩石 Nd 同位素在很大程度上确实反映了源区物质的组成性质(Nelson *et al.*，1988；Chen *et al.*，1990)，2.50～2.77 Ga 的亏损地幔模式年龄表明，界河口群泥砂质岩石物源区主体是由新太古代地壳物质所组成。但是，由于岩石中存在2.80 Ga 左右年龄信息的碎屑锆石，并有短轴-近等轴状和长柱状两种不同类型碎屑锆石存在，表明其源区组成并非单一，部分物质(虽然量少)有可能最终是来自于更为古老的中太古代陆壳基底。

由于后期地质作用的强烈改造，界河口群原有空间分布范围已很难查明，但很可能具有面状的分布特征。界河口群变玄武质岩石虽具亏损性质，不过出露很少，表明地幔添加作用十分微弱。沉积物质主要来自早期陆壳基底。根据岩石组合及泥砂质岩石的组成特征，界河口群孔兹岩系变质原岩无疑形成于陆壳基底之上，并很可能形成于被动大陆边缘的构造环境。显然，在太古宙晚期阶段，华北克拉通不但具有相当高的成熟度，其分布规模也十分的巨大，首次克拉通化已经完成。

5　结论

(1) 界河口群主要由变泥砂质岩石和一定数量的大理岩及少量斜长角闪岩组成。变泥砂质岩石常量元素组成存在较大变化，ΣREE 为152～322 μg/g，Eu/Eu* 为0.24～0.58，$(La/Yb)_n$ 为8.9～12，Nb、Ti 相对亏损，同时出现较强负铕异常(Ba/Ba* =0.18～0.71)。在岩石组合和变泥砂质岩石的组成方面，界河口群与国内外典型地区孔兹岩系十分类似。界河口群具孔兹岩系性质。

(2) 界河口群变泥砂质岩石中获得2.80±0.11 Ga 和2.03±0.05 Ga 两组(变质)碎屑锆石年龄。全岩 Nd 同位素亏损地幔模式年龄变化于2.50～2.77 Ga 之间。推测其形成年龄大致为2.2～2.3 Ga。显然，界河口群形成于古元古代，而不是新太古代，更不是中太古代的地质产物。

(3) 界河口群变泥砂质岩石的组成特征要求物源区具有很高的成熟度。其主体由新太古代富铝富钾的花岗质岩石和/或碎屑沉积岩构成，但不排除少量中太古代物质参与的可能。界河口群很可能形成于被动大陆边缘的构造环境。在太古宙晚期阶段，华北克拉通不但具有相当高的地壳成熟度，其分布规模也十分的巨大。

致谢：　野外工作期间得到山西省地勘局地质研究所刘建华、田永清高工等同志的热情帮助，深表谢意。

References

Chacko T, Kumar G R R, Meen J K and Rogers J W. 1992. Geochemistry of high-grade supracrustal rocks from the Kerala Khondalite Belt and adjacent massif charnockites, South India. In: van Reenen D D, Roering C, Ashwal L D and de Wit M J (eds.) The Archaean Limpopo Granulite Belt: Tectonics and Deep Crustal Processes. Precambrian Res., 55:469～489

Chen C H, Jhan B M and Lee T *et al.* 1990. Sm-Nd isotopic geochemistry of sediments from Taiwan and implications for the tectonic evolution of southeast China. Chem. Geol., 88:317～332

Condie K C, Boryta M D and Liu J Z *et al.* 1992. The origin of

khondalites: geochemical evidence from the Archean to Early Proterozoic granulite belt in the North China. Precambrian Research, 59:207～223

Dash B, Sahu K N and Bowes D R. 1987. Geochemistry and original nature of Precambrian khondalites in the Eastern Ghats, Orissa, India. Trans. R. Soc. Edinburgh, 78:115～127

Guo Jinghui, Zhai Mingguo, Li Yonggang *et al*. 1994. Isotopic ages and their tectonic significance of metamorphic rocks from middle part of the early Precambrian granulite belt, north China craton. In: Qian Xianglin and Wang Renmin (eds.). Geological evolution of the granulite terrain in north part of the north China craton. Beijing: Seismological Press, 130～144 (in Chinese with English abstract)

Lu Liangzhao, Xu Xeichun and Liu Fulai. 1996. Early Precambrian Khondalite Series of North China. Changchun: Changchun Publishing House, 1～276 (in Chinese)

Martin H. 1994. Archean grey gneisses and continental crust origin. In: Condie K C (ed.). Archean crustal evolution. Elsevier, Amsterdam., 205～259

Nelson B K and DePaolo D J. 1988. Comparison of isotope and petrographic provenance indicators in sediments from Tertiary continental basins of New Mexico. J. Sediment. Petrol., 58: 348～357

Shen Qihan, Zhang Yinfang, Gao Jiefeng *et al*. 1990. Study on Archaean metamorphic rocks in mid-southern Nei Mongol of China. Bulletin of the Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, 21: 1～192 (in Chinese with English abstract)

Sylvester P J. 1994. Archean granite plutons. In: Condie K C (ed.). Archean crustal evolution. Elsevier, Amsterdam., 261～314

Taylor S R and McLennan S M. 1985. The continental crust: its composition and evolution. Blackwell, London, 1～312

Wan Y S. 1999. Ba anomaly and its geochemical significance. Continental Dynamics, 4:84～87

Wu Changhua, Zhong Changting and Chen Qiangan. 1997. Discussion on the age of khondalite in Jin-Meng (Shanxi-Nei Mongol) high-grade terrain. Acta Petrologica Sinica, 13(3): 289～302 (in Chinese with English abstract)

Wu Jiashan, Geng Yuansheng and Shen Qihan. 1998. Archaean geology characteristics and tectonic evolution of China-Korea paleo-continent. Beijing: Geological Publishing House, 1～211 (in Chinese)

Yu Jinhai, Wang Dezi, Wang Ciyin *et al*. 1997. Ages of the Luliang Group and its main metamorphism in the Luliang mountains, Shanxi—evidence from single-grain zircon U-Pb age. Geological Review, 43(4):403～408 (in Chinese with English abstract)

Zhou H F, Li H M and Zhuo C L. 1993. Single-zircon U-Pb isotopic dating using ^{208}Pb-^{235}U mixture spike. In: Crust and mantle evolution and diagenetic and metallogenetic geochemistry. Beijing: Seismological Press, 202～204 (in Chinese)

附中文参考文献

郭敬辉，翟明国，李永刚，阎月华，张雯华. 1994. 晋冀内蒙交界地区早前寒武纪变质杂岩同位素年代及其构造意义. 见：钱祥麟，王仁民主编. 华北北部麻粒岩带地质演化. 北京：地震出版社，130～144

卢良兆，徐学纯，刘福来. 1996. 中国北方早前寒武纪孔兹岩系. 长春：长春出版社，1～276

沈其韩，张荫芳，高吉凤，王平. 1990. 内蒙古中南部太古宙变质岩. 中国地质科学院地质研究所所刊，21:1～192

吴昌华，钟长汀，陈强安. 1997. 晋蒙高级地体孔兹岩系的时代. 岩石学报，13(3):289～302

伍家善，耿元生，沈其韩，万渝生，刘敦一，宋彪. 1998. 中朝古大陆太古宙地质特征及构造演化. 北京：地质出版社，1～212

于津海，王德滋，王赐银. 1997. 山西吕梁群及其主变质作用时代的单颗粒锆石 U-Pb 年龄测定. 地质论评，43(4):403～408

周惠芳，李惠民，左义成. 1993. 应用^{208}Pb-^{235}U混合稀释剂进行单颗粒锆石 U-Pb 同位素定年方法的实验. 见：中国矿物岩石地球化学学会同位素地球化学专业委员会、中国地质学会同位素地质专业委员会主编. 壳幔演化与成岩成矿地球化学. 北京：地震出版社，202～204