

山西云中山地区“界河口群”重新厘定

康健丽^{1,2},王惠初^{1,2},陈枫^{1,2},曾乐^{1,2},孙义伟^{1,2},肖志斌^{1,2},田辉^{1,2}

(1.中国地质调查局天津地质调查中心,天津 300170; 2.华北地质科技创新中心,天津 300170)

摘要:云中山位于五台地区和吕梁地区的过渡部位,对研究五台杂岩和吕梁杂岩的构造关系具有重要的地质意义。云中山地区变质基底由一套石英岩、黑云变粒岩、大理岩和斜长角闪岩等变质表壳岩和新太古代花岗片麻岩组成,前人将这套变质表壳岩建造称为“界河口群”,但是从野外观察来看,这套变质建造的岩石组合与吕梁山区界河口群有很大的差异,应重新厘定。本次工作在野外调查的基础上,根据岩石组合的不同,将云中山变质表壳岩划分为两部分:Ar₃Y(代表云中山变质表壳岩)呈残留体保存在新太古代花岗片麻岩中,主要岩石类型包括:黑云变粒岩、石英岩、角闪变粒岩、斜长角闪岩等,其中花岗片麻岩的年代学研究表明该区界河口群的形成年龄老于~2.5 Ga; Pt₁qz(qz代表石英岩建造)与新太古代花岗片麻岩呈韧性剪切构造接触,部分建造被古元古代晚期侵入体分隔,主要岩石组合为一套石英岩、磁铁变粒岩、大理岩、斜长角闪岩组合,年代学研究显示,这套岩石的沉积时限应在1.94~2.14 Ga。对两套岩石中变质火山岩的地球化学研究表明,Pt₁qz形成于伸展背景下,有可能是被动大陆边缘的构造环境的产物,Ar₃Y则形成于俯冲消减的岛弧构造背景下。

关键词:云中山地区;原界河口群;解体;年代学;构造环境

中图分类号: P586;P597+.3

文献标识码: A

文章编号: 2097-0188(2022)02-0037-13

山西云中山地区位于五台山和吕梁山之间,是华北克拉通早前寒武纪变质基底的重要组成部分^[1-2]。五台和吕梁地区是早前寒武纪变质基底研究的典型地区,前人的研究已经取得了丰硕的成果^[3-22]。五台地区变质基底以五台杂岩为主,吕梁地区变质基底以吕梁杂岩为主,二者之间无论变质建造还是岩浆活动都有很大的差别,作为中部造山带的重要组成部分,厘定二者的构造关系尤为重要。近年来,随着研究的不断深入,对五台杂岩和吕梁杂岩中变质表壳岩有了更深刻的认识,也产生了很多的争议,究其原因,很大程度上是由于地理位置的差距造成二者之间缺乏一个很好的连接纽带,云中山地区是吕梁杂岩中界河口群与五台杂岩中五台岩群交汇接壤地带^[23],是研究五台杂岩和吕梁杂岩天然的绝佳位置。界河口群是云中山地区最重要的变质地层之一,因此,对界河口群的深入研究对厘清五台杂岩和吕梁杂岩的构造关系具有重要的意义。

典型的界河口群位于吕梁地区,主要岩石类型

包括(含石墨)大理岩、变泥砂质岩石和少量的斜长角闪岩,大部分建造经历角闪岩相变质作用,1/25万岢岚县幅中,该群呈带状展布于图幅中西部的界河口-奥家滩-阳坪上一带,该带也为吕梁山区该套古老表壳岩保留最好的地段,但是该套表壳岩组合已经过多次复杂的变形,变质作用的强烈改造,使得原生沉积构造、岩相标志、沉积厚度、层序等发生了根本性的改变,已不具地层学特征,也不符合地层学序律,而完全为一套构造地层单位,因此,对该套建造进行了构造地层单位划分,新建了界河口群,并给其以新的定义,界河口群包括园子坪岩组、阳坪上岩组、贺家湾岩组,将该群划归为中太古代(山西省地质调查院,2004^①)。万渝生等^[9]对奥家滩-阳坪上、西榆皮地区界河口群的研究显示其具有孔兹岩系的特征,形成年龄大致为2.2~2.3 Ga,为被动大陆边缘的产物;而Liu et al.^[24]则认为界河口群形成于~2.6 Ga,为大陆裂谷的产物,并经历了2.5 Ga的变质作用。耿元生等^[25]利用锆石单颗粒测年方法以及变泥砂质全

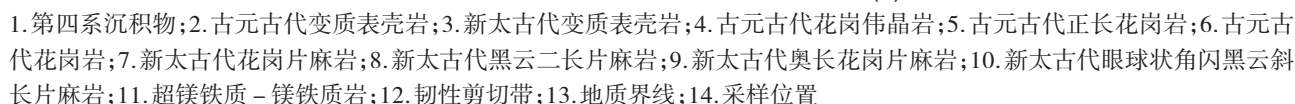
收稿日期:2020-08-06

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(41802207)和中国地质调查局项目:“河北怀安-内蒙古凉城地区区域地质调查(DD20190035)”、“燕山-太行成矿带丰宁和天镇地区地质矿产调查(DD20160042)”

作者简介:康健丽(1986-),女,硕士,高级工程师,毕业于中国地质大学(北京),主要从事前寒武纪地质学研究,E-mail:kangjianliww@126.com。

^①山西地质调查院. 1/25万岢岚县幅地质图. 山西,2004.

云中山地区大地构造位置位于五台山与吕梁山之间,属于 Zhao et al.^[28]所划分的华北克拉通中部带的中段(图 1b),以发育古元古代末期云中山花岗岩而著称,是研究华北克拉通早前寒武纪构造演化的关键部位。云中山地区的早前寒武纪地质体呈北东东向展布,韧性剪切构造发育。研究区岩浆岩主要划分为两期,早期为新太古代 TTG 片麻岩和二长花岗质片麻岩,晚期为古元古代晚期云中山后造山黑云母二长花岗岩和花岗质伟晶岩。云中山花岗岩在研究区广泛发育,耿元生等^[7-8]对五寨县东南的芦芽



山辉石英二长岩进行了锆石 SHRIMP U-Pb 测年, 获得岩体结晶年龄为 $1\,794 \pm 13$ Ma, 对宁武县堂儿上村北西的黑云母二长花岗岩的年代学研究显示其成岩年龄为 $1\,801 \pm 11$ Ma, 二者均为后造山花岗岩, 是古元古代末造山运动的产物。云中山地区新太古代 TTG 片麻岩和花岗质片麻岩的研究成果较少, 对后河堡东英云闪长片麻岩的锆石进行 U-Pb 测年, 得到其成岩年龄为 $2\,499 \pm 9$ Ma^[13], 与恒山和阜平地区 ~ 2.5 Ga 的 TTG 片麻岩相似, 可能为大陆边缘弧的产物(图 1a)。

在区域地质调查工作中(山西省地质调查院, 2004), 该区的变质表壳岩被划分为五台岩群(北部)和界河口岩群(南部), 时代分别归属于新太古代和中太古代。五台岩群包括金岗库岩组和庄旺岩组, 二者均形成于新太古代(未发表数据)。本次工作主要在云中山南部展开, 重点研究对象为原界河口群。1/25 万岢岚幅将研究区表壳岩划分为界河口群贺家湾组, 将其时代置于中太古代(山西省地质调查院, 2004), 而 1/5 万三交村幅将研究区变质表壳岩都归入界河口群奥家滩岩组, 将其时代置于新太古代, 并根据岩石组合将其划分为变粒岩段、云母片岩段、石英岩段和角闪岩段(山西地质调查院, 2013^②)。

项目组自 2012 年开始在三交镇地区开展调查工作, 经过详细的野外地质调查和精细的填图, 我们发现本区的界河口群与吕梁地区典型的界河口群有很大的区别, 缺少代表孔兹岩系的富铝泥质变质岩, 即贺家湾组的含榴矽线二云片岩、矽线白云石英片岩等云母类片岩, 岩石组合多以变粒岩、石英岩和斜长

角闪岩为主, 发育少量大理岩。根据岩石组合的不同又可将这套变质建造分为两部分, 一部分属新太古代(Ar_3Y , Y 代表云中山变质表壳岩), 呈残留体保存在新太古代眼球状花岗闪长质片麻岩中, 主要岩石类型包括: 黑云变粒岩、石英岩、斜长角闪岩、角闪变粒岩、含石榴黑云(二云)变粒岩(片岩)等, 岩石中普遍发育一组向西南(240° 左右)倾斜($20^\circ \sim 40^\circ$)的拉伸线理, 可与五台群金岗库岩组对比。另一部分归属古元古代(Pt_1qz , qz 代表石英岩建造), 与围岩呈韧性剪切构造接触或被古元古代晚期侵入体分隔, 主体为一套石英岩、长石石英岩、含磁铁矿变粒岩、含磁铁浅粒岩、二云片岩、大理岩、斜长角闪岩组合, 局部褶皱构造发育。岩石中可见较多的花岗质脉体, 长石石英岩和变粒岩中常见石榴石呈条带状或团块状分布, 大理岩也具有矽卡岩化特征, 可能是后期岩浆热液作用的产物^[1-2]。这两部分岩石最大的区别在于: (1) 石英岩变质变形程度不同。 Pt_1qz 中石英岩糜棱岩化强烈, 可见石英的拔丝构造(图 2a), 在该套岩石的顶部可见厚层状产出的变质杂砂岩, 分选和磨圆均较差; Ar_3Y 中石英岩变形程度较浅, 虽然面理也已置换层理, 但矿物形态没有发生大的变化(图 2b)。(2) 斜长角闪岩的产状不同。 Pt_1qz 中斜长角闪岩发育杏仁构造(图 3a); Ar_3Y 中斜长角闪岩则无此特征(图 3b)。

2 锆石 U-Pb 年代学特征

本次工作我们在三交镇地区分别采集了太古代的石英片岩和古元古代的长石石英岩进行 LA-

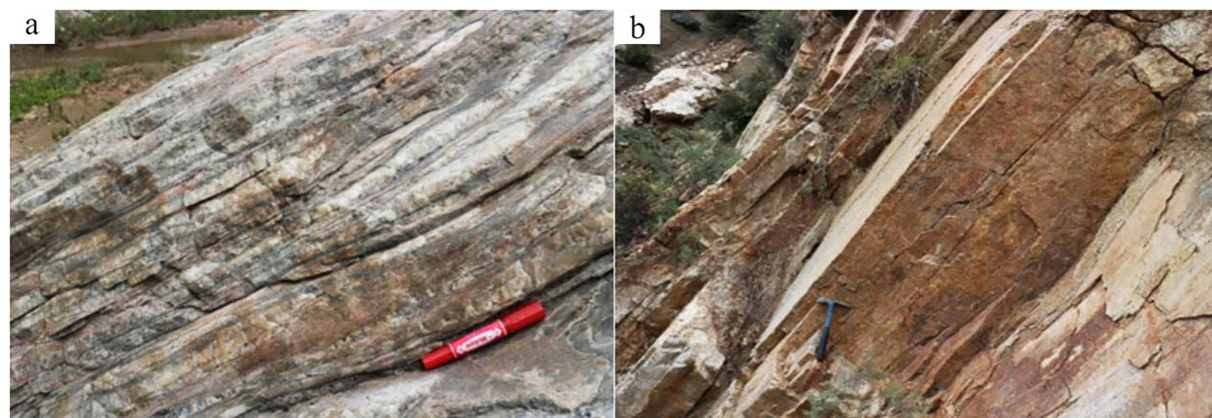


图2 三交镇地区石英岩野外露头特征

Fig.2 Field outcrop characteristics of quartzite in Sanjiao area

a. Pt_1qz 中石英岩; b. Ar_3Y 中石英岩

^②山西省地质调查院. 1/5 万杜家村幅地质图. 山西, 2013.

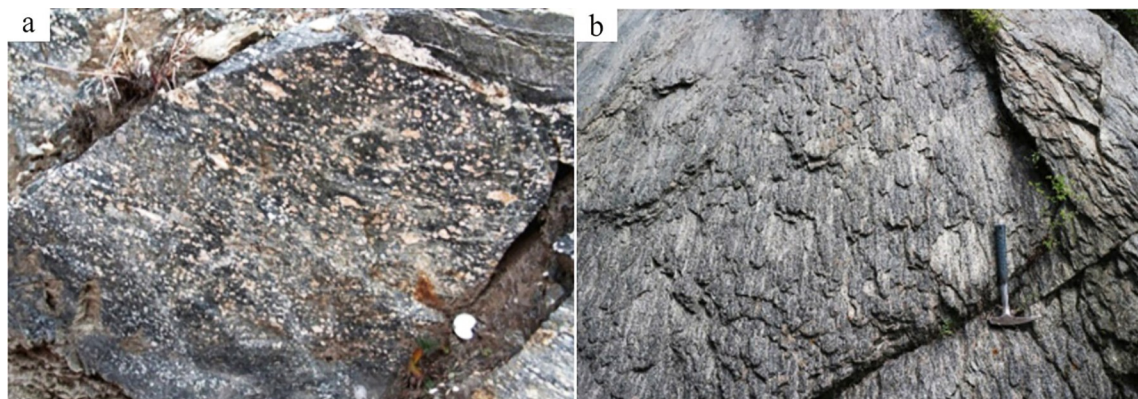


图3 三交镇地区斜长角闪岩野外露头特征

Fig.3 Field outcrop characteristics of amphibolite in Sanjiao area

a. Pt_1qz 中斜长角闪岩; b. Ar_3Y 中斜长角闪岩

ICPMS法锆石U-Pb测年工作,从中获得了一些重要年龄信息。

从三交镇峪口村沟中采集石英岩大样两件(16JL38-1、16XZ01-1),年代学分析结果分别见表1和表2。两件样品的锆石特征很相似,振荡环带明显(图4),为典型的岩浆锆石,且谐和年龄和年龄图谱也基本一致,在年龄谱图上可见~2.52 Ga和~2.65 Ga两个峰值,代表华北克拉通两次重要的地壳增生事件。16JL38-1样品部分锆石铅丢失严重,因此最小的 $^{207}Pb/^{206}Pb$ 年龄已经不能限定界河口群的上限年龄,大部分的锆石年龄组成一条不一致线,其上交点年龄分别为2 516 Ma,其余部分锆石的不一致线上交点年龄为2 654 Ma(图5)。16XZ01-1样品中大部分的锆石年龄为2 501 Ma,剩余锆石的年龄则为2 657 Ma(图6)。

3 地球化学特征

界河口群斜长角闪岩和变粒岩的岩石地球化学分析结果见表3。“界河口群”变质火山岩主要为黑云变粒岩和角闪变粒岩,斜长角闪岩较少。在 TiO_2-SiO_2 图解上可以看出,无论是古元古代的斜长角闪岩、黑云变粒岩和角闪变粒岩,亦或是新太古代的斜长角闪岩、黑云变粒岩和角闪变粒岩,其原岩均为火成岩(图7)。结合镜下鉴定的结果,古元古代斜长角闪岩原岩为玄武岩,黑云变粒岩原岩为玄武安山岩;新太古代斜长角闪岩原岩亦为玄武岩,而黑云变粒岩的原岩变化则较大,有安山岩、粗安岩和英安岩(图8)。

3.1 主量元素

Pt_1qz 斜长角闪岩和黑云变粒岩的主量元素含量

相近, SiO_2 含量为49.99%~55.71%; TiO_2 含量为0.37%~0.62%,属低钛玄武岩; Al_2O_3 含量为14.24%~17.58%,斜长角闪岩铝含量较黑云变粒岩要高; Fe_2O_3 含量为1.27%~1.89%; FeO 含量为7.81%~8.77%; CaO 含量为4.88%~9.60%; MgO 含量为6.87%~8.28%,相应的 $Mg^\#$ 为60.13~65.62; K_2O 含量为0.12%~0.50%, Na_2O 含量为3.20%~4.20%, Na_2O/K_2O 值较高,为6.4~35, CaO/Al_2O_3 为0.34~0.55,反映岩浆浅成的特点。在火山岩TAS图解中(图8), Pt_1qz 斜长角闪岩和黑云变粒岩属亚碱性系列。

Ar_3Y 斜长角闪岩与 Pt_1qz 斜长角闪岩主量元素相似,低 SiO_2 、 TiO_2 ,高 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO ,区别之处在于 Na_2O/K_2O , Ar_3Y 斜长角闪岩($Na_2O/K_2O=3.66$)较 Pt_1qz 斜长角闪岩($Na_2O/K_2O=16.52$)要低很多。 Ar_3Y 黑云变粒岩 SiO_2 含量变化较大,为54.21%~66.72%; TiO_2 含量也较低,为0.45%~0.84%; Al_2O_3 含量为14.70%~19.01%; Fe_2O_3 、 FeO 和 MgO 含量均较低; CaO 含量相差较大,为1.58%~8.02%。在火山岩TAS图解中(图8), Ar_3Y 斜长角闪岩和黑云变粒岩多分布于亚碱性系列区域,有三个样品属于碱性系列。

3.2 微量元素

Pt_1qz 斜长角闪岩稀土元素总量较低,仅为 14.10×10^{-6} ,黑云变粒岩稀土元素总量为 $66.79 \times 10^{-6} \sim 80.28 \times 10^{-6}$ 。球粒陨石标准化后的稀土元素配分曲线(图9a)表明,斜长角闪岩轻稀土亏损,重稀土较为富集,与N-MORB的稀土配分区线类似, δEu 为1.41,呈现明显的正异常,表明斜长石未分异出去。黑云变粒岩的样品具有相似的稀土配分模式,即呈现出轻稀土富集,重稀土平坦,轻、重稀土分异较为显著

续表2

样品号	含量(×10 ⁻⁶)			同位素比值						年龄(Ma)					
16XZ01-1	Pb	U	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ
39	46	89	0.72	0.472 3	0.005 8	10.511 1	0.180 3	0.161 4	0.002 5	2 494	31	2 481	43	2 470	27
40	55	117	0.62	0.430 3	0.005 2	9.697 0	0.167 0	0.163 5	0.002 6	2 307	28	2 406	41	2 492	26
41	84	152	0.78	0.487 2	0.006 1	11.976 3	0.206 5	0.178 3	0.002 8	2 559	32	2 603	45	2 637	26
42	95	163	0.88	0.500 8	0.006 2	12.756 3	0.241 9	0.184 7	0.003 0	2 617	33	2 662	50	2 696	27
43	105	345	0.87	0.273 3	0.004 0	6.707 1	0.122 7	0.178 0	0.002 8	1 557	23	2 074	38	2 634	26
44	504	968	0.12	0.504 4	0.006 1	12.237 5	0.208 2	0.175 9	0.002 7	2 633	32	2 623	45	2 615	26
45	75	150	0.50	0.466 4	0.005 5	10.257 8	0.171 2	0.159 5	0.002 5	2 468	29	2 458	41	2 450	26
46	57	143	0.78	0.364 7	0.004 9	8.512 1	0.149 6	0.169 3	0.002 7	2 004	27	2 287	40	2 551	26
47	107	232	0.73	0.421 2	0.005 1	10.558 7	0.181 8	0.181 8	0.002 9	2 266	27	2 485	43	2 669	26
48	52	101	0.63	0.476 2	0.005 6	10.704 8	0.183 3	0.163 1	0.002 6	2 510	30	2 498	43	2 488	27
49	131	211	0.86	0.513 6	0.006 0	21.993 6	0.374 6	0.310 6	0.004 9	2 672	31	3 183	54	3 524	25
50	122	234	0.52	0.476 5	0.006 3	10.827 1	0.192 3	0.164 8	0.002 6	2 512	33	2 508	45	2 505	26
51	249	482	0.89	0.455 0	0.006 3	10.055 6	0.185 3	0.160 3	0.002 5	2 417	33	2 440	45	2 459	26
52	46	107	0.68	0.387 5	0.006 6	8.835 2	0.177 9	0.165 4	0.002 6	2 111	36	2 321	47	2 511	26
53	114	225	0.50	0.466 5	0.005 6	10.281 7	0.172 3	0.159 8	0.002 5	2 468	30	2 460	41	2 454	26
54	107	193	0.83	0.493 4	0.005 8	12.867 7	0.212 6	0.189 1	0.002 9	2 586	30	2 670	44	2 735	25
55	58	113	0.44	0.469 5	0.005 8	10.923 0	0.185 0	0.168 7	0.002 6	2 481	31	2 517	43	2 545	26
56	203	374	0.84	0.467 3	0.005 7	10.583 4	0.179 0	0.164 3	0.002 6	2 472	30	2 487	42	2 500	26
57	172	370	0.65	0.416 1	0.005 3	9.290 4	0.161 4	0.162 0	0.002 5	2 243	29	2 367	41	2 476	26
58	83	148	0.46	0.503 9	0.006 0	12.470 8	0.208 1	0.179 5	0.002 8	2 630	32	2 641	44	2 648	26
59	120	291	1.15	0.361 5	0.004 9	8.766 2	0.153 9	0.175 9	0.002 7	1 989	27	2 314	41	2 614	26
60	119	216	0.61	0.490 8	0.006 0	12.345 8	0.208 0	0.182 5	0.002 8	2 574	32	2 631	44	2 675	25
61	207	427	0.90	0.420 1	0.005 0	8.671 9	0.141 5	0.149 7	0.002 3	2 261	27	2 304	38	2 343	27
62	151	387	0.99	0.336 9	0.004 4	7.435 6	0.129 6	0.160 1	0.002 4	1 872	24	2 165	38	2 456	26
63	44	79	0.83	0.480 6	0.005 9	11.322 5	0.191 1	0.170 9	0.002 7	2 530	31	2 550	43	2 566	26
64	74	138	0.66	0.479 1	0.005 7	11.091 3	0.185 0	0.167 9	0.002 6	2 523	30	2 531	42	2 537	26
65	53	94	0.83	0.494 1	0.005 9	12.178 9	0.203 4	0.178 8	0.002 8	2 588	31	2 618	44	2 641	26
66	112	217	0.49	0.473 0	0.005 8	10.600 2	0.178 8	0.162 5	0.002 5	2 497	31	2 489	42	2 482	26
67	33	60	0.86	0.472 6	0.005 6	10.647 5	0.177 5	0.163 4	0.002 5	2 495	30	2 493	42	2 491	26
68	202	515	0.85	0.356 9	0.004 3	7.703 8	0.132 5	0.156 5	0.002 4	1 968	24	2 197	38	2 419	26
69	78	155	0.38	0.468 2	0.005 5	10.798 5	0.178 5	0.167 3	0.002 6	2 475	29	2 506	41	2 531	26
70	86	224	0.72	0.357 5	0.004 7	7.955 9	0.140 2	0.161 4	0.002 5	1 970	26	2 226	39	2 471	26
71	124	283	0.72	0.398 9	0.005 4	8.909 5	0.159 8	0.162 0	0.002 5	2 164	29	2 329	42	2 477	26
72	39	77	0.61	0.456 6	0.006 5	10.131 5	0.186 3	0.160 9	0.002 5	2 424	34	2 447	45	2 466	27
73	103	257	1.42	0.336 8	0.004 2	8.095 1	0.141 7	0.174 3	0.002 7	1 871	24	2 242	39	2 599	26
74	90	203	0.54	0.419 1	0.005 5	9.940 0	0.175 0	0.172 0	0.002 7	2 256	30	2 429	43	2 578	26
75	133	382	1.32	0.304 3	0.003 7	6.615 3	0.111 5	0.157 7	0.002 4	1 713	21	2 061	35	2 431	26
76	178	362	0.35	0.466 2	0.005 8	10.211 2	0.174 8	0.158 8	0.002 5	2 467	31	2 454	42	2 443	26
77	41	74	0.78	0.484 3	0.005 7	11.192 4	0.186 0	0.167 6	0.002 6	2 546	30	2 539	42	2 534	26
78	84	159	0.77	0.472 5	0.005 9	10.499 0	0.180 2	0.161 2	0.002 5	2 495	31	2 480	43	2 468	26
79	47	91	0.69	0.466 7	0.005 5	10.429 2	0.174 8	0.162 1	0.002 6	2 469	29	2 474	41	2 477	27
80	189	346	0.60	0.498 8	0.006 3	10.964 2	0.191 9	0.159 4	0.002 5	2 609	33	2 520	44	2 449	27

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心实验室

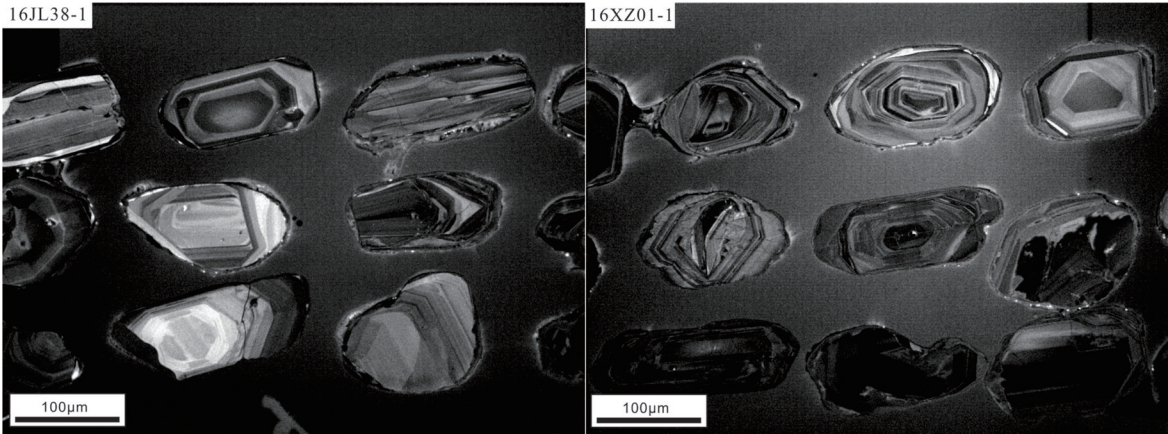


图4 三交镇地区石英岩中锆石CL图
Fig.4 Zircon's CL images of quartzite in Sanjiao area

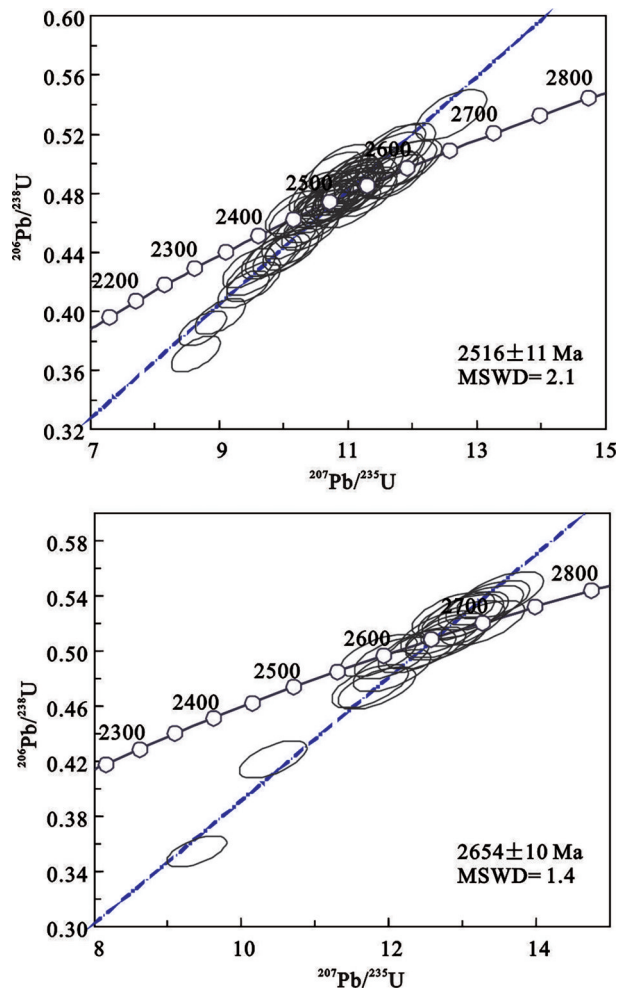


图5 山西云中山地区石英岩(16JL38-1)锆石U-Pb谐和图
Fig.5 U-Pb concordia diagrams of zircons from the quartzite(16JL38-1) in Yunzhong Mountain area, Shanxi

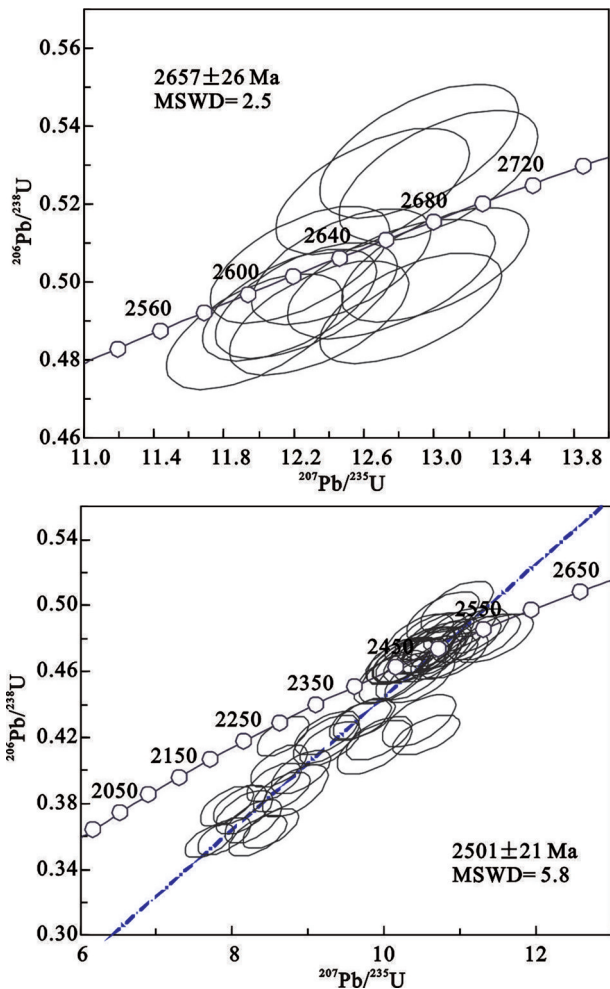


图6 山西云中山地区石英岩(16XZ01-1)锆石U-Pb谐和图
Fig.6 U-Pb concordia diagrams of zircons from the quartzite(16XZ01-1) in Yunzhong Mountain area, Shanxi

(LREE/HREE=4.57~5.13)的特征, Eu异常并不显著($\delta\text{Eu}=0.85\sim0.93$), 而且在薄片可见斜长石普遍出现, 表明虽然斜长石经历了分离结晶作用, 但是它们没有从岩浆中分离出去。在微量元素原始地幔标准化图解中(图10a), 斜长角闪岩和黑云变粒岩的配分区线也有明显的不同, 斜长角闪岩富集Rb、K、P和Sr, 略亏损Nb、Ta、Zr和Ti, 黑云变粒岩富集Rb、Th和U, 但亏损Nb、Ta、Ti和P。

Ar_3I 斜长角闪岩和黑云变粒岩稀土和微量元素具有基本相同的性质。稀土元素总量较低, 为 $51.16\times10^{-6}\sim199.06\times10^{-6}$ 。球粒陨石标准化后的稀土元素配分曲线显示轻稀土富集、重稀土亏损的右倾型, 斜长角闪岩 δEu 为1.16, 显示斜长石的堆晶, 黑云变粒岩 δEu 为0.3~0.92, 表明斜长石有一定程度的分离结晶, 并分异出去(图9b)。原始地幔标准化的微

量元素配分曲线显示强烈富集大离子亲石元素K、Rb、Th等, 亏损Nb、Ta、Sr、P和Ti, 而无Zr、Hf负异常, 具有弧岩浆的特征(图10b)。

4 讨论

云中山地区界河口群岩石组成复杂, 且变质变形强烈, 缺乏合适的测年对象, 因而研究程度较低, 关于界河口群的形成时代和沉积环境一直尚未得到很好的解决。本次工作将云中山地区的界河口群做了系统的研究, 认为应将传统意义上的界河口群进行解体。

4.1 界河口群的解体

云中山地区界河口群主要的岩石类型为黑云变粒岩、石英岩、云母片岩和斜长角闪岩等, 缺乏代表孔兹岩系的富铝泥质变质岩, 综合前人及本次的研

表1 山西云中山地区石英岩(16JL38-1)锆石U-Pb定年结果
Table 1 Zircon dating results of the quartzite (16JL38-1) in the Yunzhong Mountain, Shanxi

样品号	含量/($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄/Ma					
16JL38-1	Pb	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
1	145	273	0.50	0.482 4	0.006 2	11.256 9	0.203 8	0.169 2	0.002 7	2 538	33	2 545	46	2 550	27
2	199	382	0.42	0.479 4	0.006 2	11.019 1	0.197 6	0.166 7	0.002 7	2 525	33	2 525	45	2 525	27
3	361	897	0.47	0.368 3	0.004 7	7.940 8	0.140 2	0.156 4	0.002 5	2 021	26	2 224	39	2 417	27
4	70	154	0.33	0.421 0	0.005 6	10.435 5	0.189 4	0.179 8	0.002 8	2 265	30	2 474	45	2 651	26
5	149	261	0.57	0.513 1	0.006 5	12.719 1	0.222 8	0.179 8	0.002 8	2 670	34	2 659	47	2 651	26
6	91	163	0.86	0.494 8	0.006 1	12.047 9	0.209 4	0.176 6	0.002 8	2 591	32	2 608	45	2 621	26
7	158	324	0.31	0.466 8	0.006 0	10.161 8	0.179 6	0.157 9	0.002 5	2 469	32	2 450	43	2 433	27
8	134	231	1.91	0.464 4	0.005 7	10.224 1	0.178 4	0.159 7	0.002 6	2 459	30	2 455	43	2 452	27
9	224	583	0.69	0.363 5	0.005 1	7.422 6	0.139 9	0.148 1	0.002 4	1 999	28	2 164	41	2 324	27
10	200	392	0.61	0.471 5	0.006 1	11.019 4	0.196 8	0.169 5	0.002 7	2 490	32	2 525	45	2 553	27
11	48	86	0.55	0.509 9	0.006 8	11.707 6	0.208 9	0.166 5	0.002 6	2 656	35	2 581	46	2 523	27
12	131	242	0.68	0.496 5	0.006 6	10.877 2	0.195 7	0.158 9	0.002 5	2 599	35	2 513	45	2 444	27
13	67	114	0.62	0.532 9	0.007 1	12.608 4	0.223 6	0.171 6	0.002 7	2 754	37	2 651	47	2 573	26
14	88	170	0.39	0.492 0	0.006 5	10.759 5	0.192 2	0.158 6	0.002 5	2 579	34	2 503	45	2 441	27
15	102	196	0.62	0.480 1	0.006 2	10.551 4	0.186 9	0.159 4	0.002 5	2 528	33	2 484	44	2 449	27
16	28	52	0.54	0.495 1	0.006 4	11.363 6	0.203 8	0.166 5	0.002 7	2 593	33	2 553	46	2 522	27
17	86	161	0.82	0.478 8	0.006 1	10.632 2	0.187 1	0.161 1	0.002 6	2 522	32	2 492	44	2 467	27
18	30	50	0.94	0.526 4	0.006 8	12.875 8	0.230 2	0.177 4	0.002 9	2 726	35	2 671	48	2 629	27
19	11	20	0.81	0.475 7	0.006 0	10.943 9	0.203 1	0.166 9	0.002 9	2 509	32	2 518	47	2 526	29
20	35	66	0.45	0.492 1	0.006 3	11.657 6	0.206 4	0.171 8	0.002 7	2 580	33	2 577	46	2 575	26
21	176	407	0.27	0.419 8	0.005 6	9.542 1	0.172 8	0.164 9	0.002 6	2 260	30	2 392	43	2 506	26
22	85	143	1.58	0.488 0	0.006 3	11.073 9	0.194 7	0.164 6	0.002 6	2 562	33	2 529	44	2 503	27
23	163	315	0.42	0.489 1	0.006 6	11.011 3	0.199 9	0.163 3	0.002 6	2 567	35	2 524	46	2 490	27
24	111	214	0.44	0.481 6	0.006 3	10.972 6	0.196 3	0.165 3	0.002 6	2 534	33	2 521	45	2 510	27
25	77	147	0.68	0.474 3	0.006 2	10.691 7	0.191 9	0.163 5	0.002 6	2 502	33	2 497	45	2 492	27
26	68	128	0.74	0.473 8	0.006 0	10.746 5	0.189 0	0.164 5	0.002 6	2 500	32	2 501	44	2 502	27
27	81	178	1.49	0.396 5	0.005 0	9.028 6	0.158 3	0.165 1	0.002 6	2 153	27	2 341	41	2 509	26
28	96	186	0.57	0.475 5	0.006 1	10.913 6	0.190 4	0.166 5	0.002 6	2 508	32	2 516	44	2 522	26
29	93	152	1.20	0.511 1	0.006 7	12.798 5	0.226 6	0.181 6	0.002 8	2 661	35	2 665	47	2 668	26
30	126	255	1.28	0.424 1	0.005 5	9.543 8	0.169 4	0.163 2	0.002 5	2 279	30	2 392	42	2 489	26
31	48	78	1.17	0.508 8	0.006 5	12.787 5	0.224 0	0.182 3	0.002 9	2 652	34	2 664	47	2 674	26
32	162	316	0.37	0.479 2	0.006 1	10.926 6	0.191 9	0.165 4	0.002 6	2 524	32	2 517	44	2 511	26
33	58	113	1.35	0.435 5	0.005 9	9.780 3	0.177 1	0.162 9	0.002 6	2 330	32	2 414	44	2 486	27
34	31	57	0.52	0.490 9	0.006 2	11.710 8	0.204 2	0.173 0	0.002 7	2 575	33	2 582	45	2 587	26
35	92	179	0.50	0.471 3	0.006 1	10.598 6	0.186 0	0.163 1	0.002 5	2 489	32	2 489	44	2 488	26
36	52	103	0.63	0.461 1	0.006 4	10.486 6	0.191 8	0.165 0	0.002 6	2 444	34	2 479	45	2 507	26
37	69	134	0.52	0.471 7	0.006 0	10.722 8	0.186 1	0.164 9	0.002 6	2 491	31	2 499	43	2 506	26
38	79	155	1.09	0.448 9	0.005 8	10.096 0	0.176 7	0.163 1	0.002 5	2 390	31	2 444	43	2 488	26
39	153	275	0.56	0.500 0	0.006 4	12.388 5	0.217 3	0.179 7	0.002 8	2 614	33	2 634	46	2 650	26
40	45	98	0.10	0.441 7	0.005 7	10.128 1	0.179 3	0.166 3	0.002 6	2 358	31	2 447	43	2 521	27
41	64	124	0.57	0.470 7	0.005 9	10.575 7	0.185 2	0.163 0	0.002 6	2 487	31	2 487	44	2 487	27
42	40	72	1.11	0.467 4	0.005 9	10.563 6	0.185 6	0.163 9	0.002 6	2 472	31	2 486	44	2 497	27
43	117	222	0.52	0.479 0	0.006 1	11.280 5	0.198 6	0.170 8	0.002 7	2 523	32	2 547	45	2 566	26
44	135	241	1.02	0.474 4	0.006 3	11.747 3	0.210 3	0.179 6	0.002 8	2 503	33	2 584	46	2 649	26
45	76	154	0.52	0.455 3	0.005 9	10.426 1	0.185 2	0.166 1	0.002 6	2 419	31	2 473	44	2 518	26
46	337	633	0.26	0.503 7	0.007 1	11.656 9	0.216 6	0.167 8	0.002 6	2 630	37	2 577	48	2 536	26
47	106	200	0.49	0.484 0	0.006 2	11.066 1	0.195 5	0.165 8	0.002 6	2 545	32	2 529	45	2 516	27
48	239	413	0.51	0.525 6	0.007 2	13.036 8	0.240 3	0.179 9	0.002 9	2 723	37	2 682	49	2 652	27
49	21	38	0.61	0.499 5	0.006 3	11.847 9	0.215 1	0.172 0	0.002 8	2 612	33	2 592	47	2 577	28
50	116	231	0.67	0.457 2	0.006 0	10.322 9	0.184 6	0.163 7	0.002 6	2 427	32	2 464	44	2 495	27
51	38	70	0.55	0.496 5	0.006 4	11.872 2	0.211 2	0.173 4	0.002 8	2 599	33	2 594	46	2 591	27
52	218	441	0.88	0.438 2	0.005 9	9.977 9	0.180 3	0.165 1	0.002 6	2 343	32	2 433	44	2 509	26
53	133	223	0.48	0.540 4	0.006 9	13.525 4	0.239 1	0.181 5	0.002 9	2 785	36	2 717	48	2 667	26
54	163	1075	0.17	0.153 0	0.002 0	2.173 8	0.039 8	0.103 1	0.001 6	9 18	12	1 173	21	1 680	29
55	67	136	0.83	0.437 6	0.005 8	9.849 6	0.179 0	0.163 3	0.002 6	2 340	31	2 421	44	2 490	27
56	91	160	1.05	0.472 8	0.006 3	11.843 2	0.216 5	0.181 7	0.002 9	2 496	33	2 592	47	2 668	27
57	25	46	0.12	0.524 6	0.006 8	12.981 4	0.235 1	0.179 5	0.002 9	2 719	35	2 678	49	2 648	27

续表1

样品号	含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄/Ma					
16JL38	Pb	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
-1															
58	71	116	0.40	0.556 0	0.007 1	14.745 8	0.262 6	0.192 4	0.003 1	2 850	37	2 799	50	2 762	26
59	63	106	1.11	0.492 9	0.006 3	11.589 2	0.204 6	0.170 5	0.002 7	2 583	33	2 572	45	2 563	27
60	145	273	0.48	0.485 4	0.006 2	11.100 5	0.194 2	0.165 8	0.002 6	2 551	32	2 532	44	2 516	26
61	150	241	1.00	0.520 2	0.006 9	13.009 8	0.232 0	0.181 4	0.002 8	2 700	36	2 680	48	2 665	26
62	20	37	0.48	0.490 6	0.006 1	11.041 0	0.194 7	0.163 2	0.002 6	2 573	32	2 527	45	2 489	27
63	119	240	1.33	0.388 1	0.004 7	8.751 2	0.150 9	0.163 5	0.002 6	2 114	26	2 312	40	2 492	27
64	242	585	0.76	0.354 6	0.004 5	9.396 8	0.166 8	0.192 2	0.003 0	1 957	25	2 378	42	2 761	26
65	51	96	0.44	0.488 6	0.006 2	11.270 8	0.197 5	0.167 3	0.002 7	2 565	32	2 546	45	2 531	27
66	199	480	0.58	0.370 8	0.004 9	8.644 0	0.155 9	0.169 1	0.002 7	2 033	27	2 301	42	2 548	26
67	34	57	0.59	0.534 6	0.006 6	13.346 3	0.231 0	0.181 1	0.002 9	2 761	34	2 704	47	2 663	26
68	45	85	0.43	0.480 0	0.006 1	10.813 6	0.189 9	0.163 4	0.002 6	2 527	32	2 507	44	2 491	27
69	162	301	0.56	0.485 4	0.006 3	12.047 2	0.212 7	0.180 0	0.002 8	2 551	33	2 608	46	2 653	26
70	80	176	0.71	0.414 1	0.005 2	9.385 8	0.162 5	0.164 4	0.002 6	2 234	28	2 376	41	2 501	27
71	32	58	1.26	0.445 3	0.005 9	10.178 1	0.182 0	0.165 8	0.002 7	2 374	32	2 451	44	2 515	27

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心实验室

表2 山西云中山地区石英岩(16XZ01-1)锆石U-Pb定年结果

Table 2 Zircon dating results of the quartzite (16XZ01-1) in the Yunzhong Mountain, Shanxi

样品号	含量($\times 10^{-6}$)			同位素比值						年龄/Ma					
16XZ01-1	Pb	U	Th/U	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1 σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
1	62	105	0.55	0.527 2	0.006 9	13.024 6	0.231 5	0.179 2	0.002 8	2 730	36	2 681	48	2 645	26
2	81	160	0.53	0.455 5	0.006 1	10.467 7	0.186 3	0.166 7	0.002 6	2 419	32	2 477	44	2 525	26
3	195	440	1.08	0.368 9	0.005 4	8.286 4	0.151 1	0.162 9	0.002 6	2 024	30	2 263	41	2 486	27
4	55	117	0.65	0.431 1	0.005 2	9.737 5	0.165 9	0.163 8	0.002 6	2 311	28	2 410	41	2 495	26
5	121	234	0.53	0.472 1	0.006 2	10.701 1	0.188 3	0.164 4	0.002 6	2 493	33	2 498	44	2 501	26
6	118	216	0.61	0.495 1	0.006 1	12.272 0	0.211 4	0.179 8	0.002 8	2 593	32	2 625	45	2 651	26
7	86	224	0.71	0.359 6	0.004 7	7.901 8	0.142 6	0.159 4	0.002 5	1 980	26	2 220	40	2 449	27
8	185	346	0.58	0.492 5	0.006 2	10.781 0	0.192 6	0.158 8	0.002 5	2 582	33	2 504	45	2 442	27
9	158	277	1.24	0.479 8	0.006 0	10.468 4	0.185 5	0.158 3	0.002 5	2 526	32	2 477	44	2 437	27
10	62	105	0.54	0.533 5	0.007 0	12.916 3	0.231 8	0.175 6	0.002 8	2 756	36	2 674	48	2 612	26
11	300	1163	0.47	0.249 8	0.003 0	4.429 4	0.074 8	0.128 6	0.002 0	1 437	17	1 718	29	2 079	28
12	79	286	0.74	0.244 0	0.003 1	6.140 6	0.107 2	0.182 5	0.002 8	1 407	18	1 996	35	2 676	26
13	164	364	1.63	0.360 2	0.005 1	8.338 0	0.155 4	0.167 9	0.002 6	1 983	28	2 268	42	2 537	26
14	40	96	0.40	0.386 7	0.004 9	8.657 0	0.150 9	0.162 4	0.002 5	2 107	27	2 303	40	2 480	26
15	43	90	0.91	0.429 7	0.006 5	10.462 8	0.195 2	0.176 6	0.002 8	2 304	35	2 477	46	2 621	27
16	71	154	0.84	0.413 8	0.006 8	9.877 8	0.202 6	0.173 1	0.002 7	2 232	37	2 423	50	2 588	26
17	86	155	0.37	0.504 5	0.006 0	13.009 2	0.219 0	0.187 0	0.002 9	2 633	31	2 680	45	2 716	26
18	41	150	1.05	0.240 2	0.003 4	6.081 5	0.112 9	0.183 6	0.002 9	1 388	20	1 988	37	2 686	26
19	67	194	0.63	0.302 6	0.004 3	6.785 8	0.124 5	0.162 6	0.002 5	1 704	24	2 084	38	2 483	26
20	81	160	0.51	0.456 8	0.006 1	10.353 0	0.184 8	0.164 4	0.002 6	2 425	32	2 467	44	2 501	26
21	120	255	0.89	0.418 2	0.006 1	9.248 3	0.176 1	0.160 4	0.002 5	2 252	33	2 363	45	2 460	27
22	20	38	0.89	0.480 8	0.006 0	10.617 5	0.191 5	0.160 1	0.002 7	2 531	32	2 490	45	2 457	28
23	57	190	1.26	0.273 3	0.003 5	5.837 2	0.105 8	0.154 9	0.002 5	1 558	20	1 952	35	2 400	28
24	155	352	0.49	0.422 3	0.005 5	9.251 8	0.172 2	0.158 9	0.002 6	2 271	29	2 363	44	2 444	28
25	133	256	0.85	0.479 9	0.006 1	11.463 6	0.209 2	0.173 3	0.002 9	2 527	32	2 562	47	2 589	28
26	32	60	0.78	0.485 0	0.005 8	10.994 1	0.194 6	0.164 4	0.002 7	2 549	30	2 523	45	2 501	28
27	48	87	0.40	0.523 3	0.006 5	12.651 1	0.224 2	0.175 3	0.002 8	2 713	34	2 654	47	2 609	27
28	183	457	0.50	0.378 1	0.004 9	7.937 0	0.144 2	0.152 2	0.002 4	2 068	27	2 224	40	2 371	27
29	285	716	0.47	0.379 2	0.004 7	8.107 4	0.141 0	0.155 1	0.002 5	2 073	26	2 243	39	2 402	27
30	186	440	1.06	0.374 4	0.005 5	8.158 2	0.152 2	0.158 0	0.002 6	2 050	30	2 249	42	2 435	27
31	184	542	0.83	0.319 9	0.004 0	6.574 0	0.115 3	0.149 1	0.002 4	1 789	23	2 056	36	2 335	28
32	52	126	1.14	0.375 1	0.004 7	8.984 8	0.160 7	0.173 7	0.002 9	2 053	25	2 336	42	2 594	28
33	21	40	1.02	0.466 4	0.005 7	10.214 1	0.186 8	0.158 8	0.002 8	2 468	30	2 454	45	2 443	30
34	42	160	0.65	0.234 9	0.002 7	5.957 4	0.102 7	0.183 9	0.003 0	1 360	16	1 970	34	2 689	27
35	169	339	0.58	0.466 0	0.005 7	10.333 8	0.178 5	0.160 8	0.002 6	2 466	30	2 465	43	2 464	27
36	180	423	0.48	0.402 3	0.005 2	8.622 0	0.152 5	0.155 4	0.002 4	2 180	28	2 299	41	2 407	27
37	104	247	0.80	0.392 8	0.004 8	8.557 4	0.146 1	0.158 0	0.002 5	2 136	26	2 292	39	2 435	26
38	248	470	0.70	0.481 3	0.005 9	10.736 2	0.183 3	0.161 8	0.002 5	2 533	31	2 501	43	2 474	26

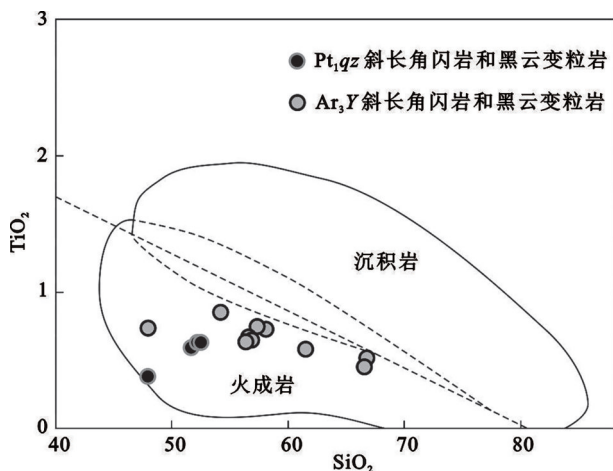


图7 山西云中山地区黑云变粒岩和斜长角闪岩
TiO₂-SiO₂图解

Fig.7 TiO₂-SiO₂ diagram of Bi-leptynite and amphibolite in Yunzhong Mountain area, Shanxi

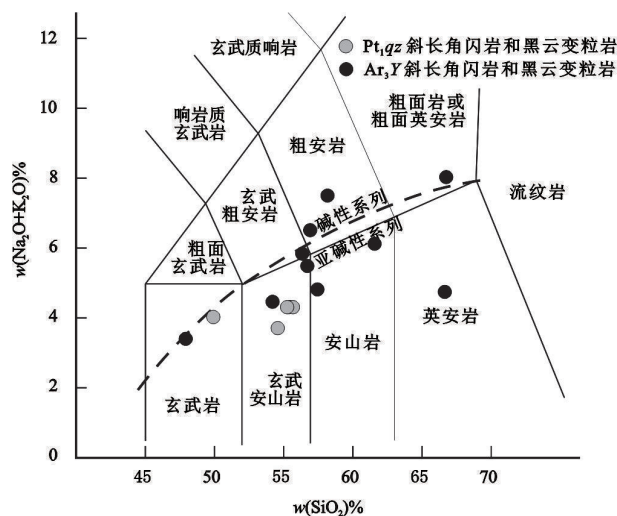


图8 山西云中山地区黑云变粒岩和斜长角闪岩TAS图解
Fig.8 TAS diagram of Bi-leptynite and amphibolite in Yunzhong Mountain area, Shanxi

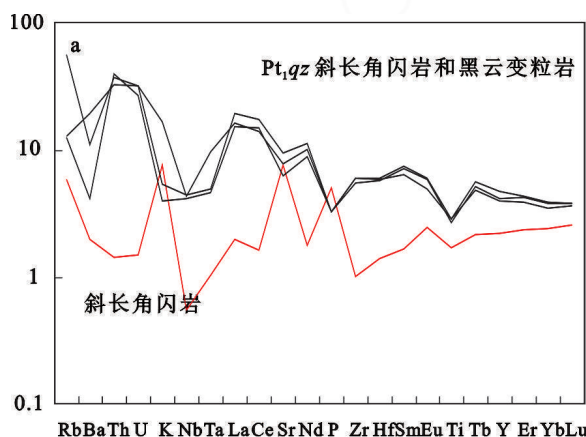


图10 山西云中山地区黑云变粒岩和斜长角闪岩原始地幔标准化微量元素蛛网图(PM标准值据Sun and McDonough^[29])
Fig.10 PM-normalized incompatible element spider pattern of Bi-leptynite and amphibolite in Yunzhong Mountain area, Shanxi(chondrite value of Sun and McDonough^[29])

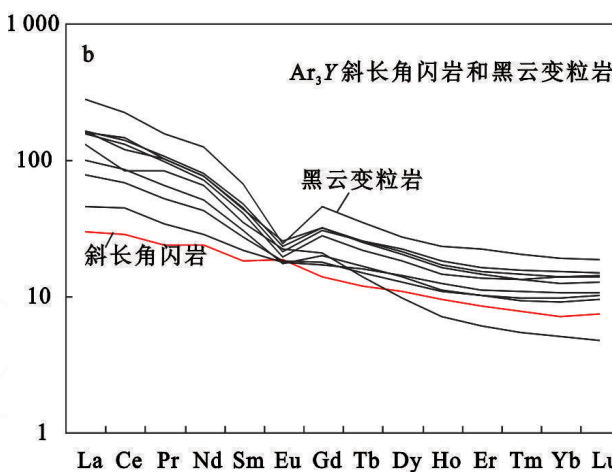
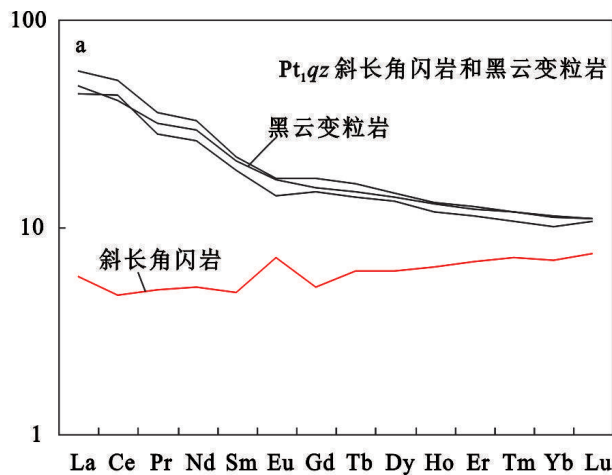
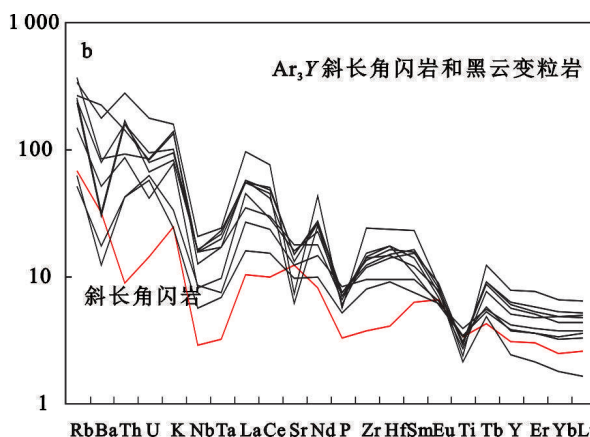


图9 山西云中山地区黑云变粒岩和斜长角闪岩
球粒陨石标准化REE配分模式图
(球粒陨石标准化值据Sun and McDonough, 1989)
Fig.9 Chondrite-normalized REE pattern of Bi-leptynite and amphibolite in Yunzhong Mountain area, Shanxi (chondrite value of Sun and McDonough, 1989)



口群的形成年龄老于~2.5 Ga,为新太古代的变质建造,根据地球化学特征,二云母片岩的原岩应为泥砂质岩石,石英岩的原岩为砂岩, SiO_2 可达90%以上,二者应为新太古代晚期的沉积建造,可与五台群对比表明在新太古代晚期已存在相对成熟的地壳;另一种与新太古代古元古代花岗岩呈韧性剪切构造接触或被古元古代晚期侵入体分隔,主体为一套石英岩、长石石英岩、含磁铁矿变粒岩、含磁铁浅粒岩、二云片岩、大理岩、斜长角闪岩组合^[1-2],对其中石英岩的年代学研究显示,碎屑锆石年龄出现两个峰值,分别是 $2\,143\pm 15\text{ Ma}$ 和 $2\,599\pm 11\text{ Ma}$,~2.6 Ga的锆石为捕获的岩浆锆石,~2.14 Ga的这一组年龄与赤坚岭杂岩的形成时代相当,因此,这部分石英岩的形成时代应晚于~2.14 Ga,另外,该套岩石中大理岩被 $1\,940\text{ Ma}$ 含石榴二长花岗片麻岩侵入^[27],表明二者的沉积时限应在 $1.94\sim 2.14\text{ Ga}$,在长石石英岩中有斜长角闪岩夹层,可见明显的气孔杏仁构造,与“野鸡山群”白龙山组相似^[27],结合岩石组合与变形特征,我们推断该区域河口群大致可与溲沱群、岚河群和野鸡山群对比。

4.2 界河口岩群的形成环境与构造意义

研究区 Ar_3I 斜长角闪岩在 TAS 图解上显示为玄武岩, 低 SiO_2 、 TiO_2 , 高 Al_2O_3 、 CaO 和 MgO , 显示高铝玄武岩的特征。黑云变粒岩 SiO_2 含量变化较大, 在 TAS 图解中显示从玄武安山岩到英安岩均有分布。 Ar_3I 斜长角闪岩和黑云变粒岩均表现出大离子亲石元素和轻稀土元素明显富集及高场强元素 Nb、Ta 和 Ti 明显亏损的地球化学特征, 显示其形成与大洋板块俯冲作用有关^[30]。

Pt₁qz斜长角闪岩和黑云变粒岩Mg[#]值较高(平均62.51),接近幔源玄武质原生岩浆镁质范围^[33],可能为部分熔融的产物。斜长角闪岩稀土总量极低,甚至低于N-MORB,配分区线与N-MORB也有一定的相似性,可能为伸展背景下的产物。黑云变粒岩轻重稀土分异比较明显,右倾型,微量元素相对富集大离子亲石元素Rb、Th和U,略亏损Nb、Ta、Ti和P等高场强元素,兼具消减和板内玄武岩的特征,但较高的Zr含量($61.70 \times 10^{-6} \sim 67.20 \times 10^{-6}$)和Zr/Y值(3.17~3.71),与板内玄武岩更为接近。另外,(Th/Nb)N值为2.58~9.72(>1),Nb/La值为0.24~0.29(<1),加之Nb、Ta、Ti的负异常,是受地壳混染大陆玄武岩的典型特征^[34]。同时,在构造环境判别图解上(图11)可见,斜长角闪岩和黑云变粒岩的样品均落

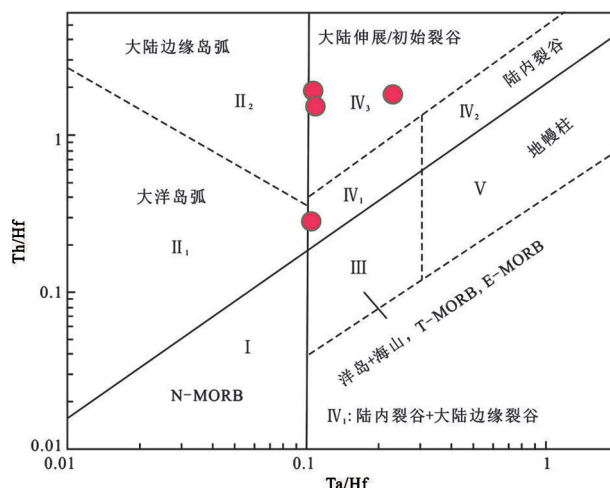


图 11 山西云中山地区 Pt,qz 变质火山岩的构造判别图解
Fig.11 Tectonic discrimination diagrams
of the Pt,qz metavolcanics rocks
in Yunzhong Mountain area, Shanxi

在陆内裂谷或陆源裂谷的区域内。结合 Pt, qz 的岩石组合特征, 推测该套岩石有可能形成于陆内裂谷的构造环境, 万渝生等^[9]对赤坚岭地区界河口岩群的研究也得到相同的结论, 而大理岩的发育则是陆内裂谷盆地向陆表海演化过程中的沉积建造。

界河口岩群在形成时代和构造环境上一直存在很大的争议,万渝生等^[9]、吴昌华等^[35]认为界河口岩群属孔兹岩系,形成于华北太古宙克拉通被动大陆边缘的构造环境,其时代为古元古代。李江海等^[36]则认为界河口岩群的裂谷属性是由于古元古代裂谷环境的岩浆建造叠加于孔兹岩系之上造成的,实际上,界河口岩群孔兹岩系属于新太古代。本次工作对云中山地区界河口岩群的详细研究认为本区界河口岩群应划分为两部分,一部分归属于古元古代,另一部分归属于新太古代,地球化学特征的研究也显示,这两套岩石性质完全不同,放在一起建群并不合适。

近年来,吕梁-云中山地区早前寒武纪基底演化的研究取得了很大的进展,大量的证据表明新太古代处于俯冲消减的构造背景之下。云中山地区~2.5 Ga的TTG^[1]和变质高镁火成岩组合^[2]都是形成于消减俯冲的大陆岛弧环境,而且变质高镁火成岩组合从超镁铁质岩到高镁安山岩似乎具有从大洋岛弧向大陆岛弧演化的趋势,为太古宙板块俯冲和洋陆转换提供了新证据。2.45~2.20 Ga处于全球岩浆活动的“宁静期”,克拉通内部以陆内伸展、大陆裂开和被动大陆边缘沉积环境为典型特征^[37]。然而,近年来的研究显示,越老越多该时期的岩浆记录被发现^[38-40]。

表4 山西云中山地区变质火山岩主量元素(wt%)和微量元素($\times 10^{-6}$)地球化学分析数据
Table 4 Major (wt %) and trace elements ($\times 10^{-6}$) compositions of the metavolcanics rocks
in the Yunzhong Mountain, Shanxi

样品号	12LL17	15XZ12	15XZ12	15XZ12	15XZ13	15XZ21	16XZ01	15XZ21	15XZ27	15XZ27	15XZ27	15XZ27	15XZ21	15XZ14
	-2	-2	-1	-4		-2	-5	-3	-1	-2	-3	-5	-1	-2
时代	Ptqz					Ar ₃ Y								
岩石名称	斜长角闪岩	黑云变粒岩			斜长角闪岩	黑云变粒岩								
SiO ₂	49.99	55.30	55.71	54.64	47.93	54.21	57.46	58.15	56.34	56.91	61.59	56.69	66.62	66.76
Al ₂ O ₃	17.58	14.77	14.46	14.24	17.16	15.49	14.70	19.01	17.58	17.12	16.14	17.72	15.26	16.11
Fe ₂ O ₃	1.66	1.89	1.27	1.58	2.75	2.62	1.78	1.61	7.26	7.39	4.88	7.67	1.53	1.61
FeO	7.87	8.20	8.77	7.81	6.74	7.53	6.07	5.16	1.64	1.57	2.97	1.79	3.54	2.55
CaO	9.60	6.48	4.88	7.14	9.59	6.81	8.02	1.58	5.43	4.61	3.25	5.06	3.81	1.66
MgO	7.14	6.87	8.04	8.28	8.88	6.26	4.60	2.78	4.12	3.92	3.29	3.76	2.62	1.26
K ₂ O	0.23	0.16	0.12	0.50	0.73	0.72	1.00	4.17	3.03	3.98	2.80	2.47	2.32	4.78
Na ₂ O	3.80	4.14	4.20	3.20	2.67	3.71	3.78	3.33	2.81	2.53	3.31	3.00	2.42	3.25
TiO ₂	0.37	0.62	0.62	0.58	0.72	0.84	0.74	0.72	0.62	0.63	0.58	0.66	0.45	0.51
P ₂ O ₅	0.11	0.07	0.07	0.07	0.07	0.11	0.18	0.14	0.16	0.15	0.13	0.16	0.15	0.12
MnO	0.17	0.21	0.22	0.19	0.14	0.15	0.14	0.07	0.13	0.12	0.09	0.09	0.07	0.07
LOI	0.69	0.47	0.73	0.98	1.99	0.77	0.89	2.76	0.71	0.94	0.67	0.77	0.84	1.17
Total	99.21	99.18	99.09	99.21	99.37	99.22	99.36	99.48	99.83	99.87	99.70	99.84	99.63	99.85
Mg ^g	62.02	60.13	62.27	65.62	70.34	59.94	57.70	49.23	81.89	81.80	66.60	79.08	57.12	47.07
Pb	3.99	4.38	3.83	11.50	55.40	4.66	11.10	105.00	19.30	24.20	9.46	15.70	8.64	15.00
Cr	102.00	278.00	276.00	261.00	203.00	122.00	122.00	122.00	91.40	93.90	76.40	93.90	122.00	59.40
Ni	134.00	94.90	97.90	89.50	117.00	98.80	21.10	64.80	48.60	48.10	50.70	53.30	61.30	18.20
Co	46.70	53.80	56.30	50.00	57.80	37.50	24.60	21.60	22.70	21.70	22.40	26.10	19.80	12.20
Rb	3.70	8.20	7.90	36.30	43.30	32.60	39.70	233.00	154.00	170.00	147.00	160.00	94.70	212.00
Sr	161.00	200.00	131.00	165.00	254.00	203.00	259.00	369.00	311.00	310.00	127.00	274.00	334.00	151.00
Ba	13.70	136.00	29.10	76.70	220.00	121.00	85.60	581.00	552.00	1560.00	207.00	220.00	360.00	1220.00
Sc	16.80	26.70	26.30	24.70	16.30	20.50	29.80	13.90	18.00	17.30	17.70	19.80	12.50	11.10
Nb	0.39	3.16	2.95	3.09	2.03	4.00	5.94	8.90	11.10	10.90	11.20	11.50	5.70	14.60
Ta	0.04	0.20	0.19	0.40	0.13	0.28	0.30	0.69	0.69	0.80	0.93	0.87	0.39	0.98
Zr	11.20	67.20	67.10	61.70	41.40	87.90	104.00	171.00	137.00	130.00	160.00	150.00	156.00	269.00
Hf	0.43	1.84	1.79	1.76	1.23	2.77	2.92	5.37	4.54	4.32	5.27	5.02	4.50	7.20
Ga	13.90	14.80	13.80	13.90	17.60	16.10	17.80	20.00	21.40	20.50	18.90	21.90	17.70	20.40
U	0.03	0.68	0.57	0.68	0.30	1.19	1.31	1.76	1.98	1.73	1.64	1.39	0.87	3.68
Th	0.12	2.78	3.42	3.17	0.74	3.53	3.58	7.87	13.50	12.10	13.50	14.20	7.32	23.60
La	1.36	13.40	10.40	11.30	7.05	10.80	18.40	23.60	38.70	37.50	37.00	38.90	31.00	66.40
Ce	2.86	30.90	26.30	24.90	17.40	27.10	41.60	52.10	84.60	89.50	80.30	72.80	50.80	135.00
Pr	0.47	3.38	2.64	3.00	2.25	3.23	4.96	6.19	9.99	9.60	9.14	9.71	7.98	14.70
Nd	2.38	15.20	12.10	13.60	11.00	13.30	19.80	23.60	37.00	35.50	33.40	35.60	30.50	58.40
Sm	0.74	3.30	2.85	3.19	2.77	3.30	4.12	4.66	7.20	6.69	6.18	6.82	5.32	10.10
Eu	0.41	1.00	0.82	0.98	1.08	1.03	1.06	1.00	1.34	1.47	1.14	1.23	1.30	1.41
Gd	1.06	3.51	3.01	3.19	2.85	3.50	3.63	4.11	6.47	6.54	5.67	6.29	4.28	9.43
Tb	0.23	0.60	0.52	0.55	0.45	0.59	0.56	0.62	0.96	0.93	0.81	0.96	0.52	1.30
Dy	1.56	3.70	3.37	3.52	2.77	3.60	3.23	3.56	5.44	5.20	4.60	5.62	2.49	6.92
Ho	0.36	0.74	0.67	0.73	0.54	0.70	0.62	0.63	0.97	0.93	0.83	1.03	0.40	1.33
Er	1.12	2.06	1.86	2.01	1.41	1.85	1.70	1.69	2.52	2.41	2.25	2.72	1.00	3.66
Tm	0.18	0.30	0.27	0.30	0.20	0.28	0.24	0.25	0.37	0.34	0.34	0.40	0.14	0.52
Yb	1.18	1.91	1.71	1.88	1.20	1.81	1.56	1.64	2.36	2.13	2.37	2.58	0.86	3.20
Lu	0.19	0.28	0.27	0.28	0.19	0.27	0.24	0.26	0.35	0.32	0.36	0.38	0.12	0.47
Y	9.93	21.20	18.10	18.90	13.80	18.50	17.20	16.70	26.80	25.20	22.90	28.20	10.90	35.40
δEu	1.41	0.89	0.85	0.93	1.16	0.82	0.92	0.43	0.81	0.68	0.59	0.67	0.58	0.56

测试单位:中国地质调查局天津地质调查中心实验室

究成果,将界河口群的岩石类型归纳为五类:黑云变粒岩、石英岩、二云母片岩、大理岩和斜长角闪岩。云中山地区界河口群存在两种产出状态,一种呈残留体保存在新太古代眼球状花岗闪长质片麻岩中,主要岩石类型包括:黑云变粒岩、石英岩、角闪变粒

岩、含石榴黑云(二云)变粒岩(片岩)、斜长角闪岩等,其中石英岩的年代学研究显示其中碎屑锆石全部为~2.5 Ga和2.65 Ga的岩浆锆石,未见古元古代的年代学信息,同时,这部分变质建造以包裹体的形式存在于~2 486 Ma的花岗片麻岩中^[1],这表明该区界河

吕梁地区~2.38 Ga的盖家庄A型花岗岩^[41]以及云中山地区~2.37 Ga的I型花岗岩(庞志斌未发表数据)的发现,表明吕梁-云中山地区这一时期岩浆活动依然活跃。盖家庄A2型花岗岩和云中山北段的I型花岗岩的确定揭示了华北克拉通在~2.5 Ga形成之后于~2.4 Ga开始转入陆块碰撞拼合之后的伸展拉张构造环境,并在此后相继发生裂解、消减和最终碰撞拼合形成统一稳定的华北克拉通^[42],而云中山地区Pt₁qz、吕梁地区的岚河群和野鸡山群、五台地区的滹沱群即是在裂解阶段形成的沉积建造,同时,赞皇地区许亭花岗岩^[43]和云中山北段~2.1 Ga的变质酸性侵入岩(庞志斌未发表数据)也是该期裂解事件的产物。

5 结论

(1)云中山地区原“界河口群”变质表壳岩应划分为两部分:一部分为Ar₃I,形成年龄老于~2.5 Ga,呈残留体保存在新太古代花岗片麻岩中,主要岩石类型包括:黑云变粒岩、石英岩、角闪变粒岩、斜长角闪岩等;另一部为Pt₁qz,沉积时限应在1.94~2.14 Ga,与新太古代花岗岩呈韧性剪切构造接触或被古元古代晚期侵入体分隔,主体为一套石英岩、磁铁变粒岩、大理岩、斜长角闪岩组合。

(2)对两套岩石中变质火山岩的地球化学研究表明,Pt₁qz形成于伸展背景下,有可能是陆内裂谷构造环境的产物,Ar₃I则形成于俯冲消减的岛弧构造背景下,两套岩石的产出展示了云中山地区由太古代的俯冲消减向后期伸展的过程。

参考文献:

- [1] 康健丽,王惠初,肖志斌,等.华北克拉通新太古代地壳增生:来自山西云中山地区TTG片麻岩和二长花岗片麻岩的证据[J].岩石学报,2017,(09):2881-2898.
- [2] 王惠初,康健丽,肖志斌,等.华北克拉通新太古代板块俯冲作用:来自山西云中山地区变质高镁火成岩组合的证据[J].岩石学报,2018,33(9):1099-1118.
- [3] 白瑾.五台山早前寒武纪地质[M].天津:天津科技出版社,1986.
- [4] 白瑾,黄学光,王惠初,等.中国前寒武纪地壳演化(第二版)[M].北京:地质出版社,1996.
- [5] YU J H, WANG D Z, WANG X Y, et al. Ages of L ü liang Group and its metamorphism in Mt. L ü liang Region, Shanxi Province: evidence from single grain zircon U-Pb dating[J]. Chinese Journal of Geochemistry. 1997, 16:170-177.
- [6] 于津海,王德滋,王赐银,等.山西吕梁山中段元古代花岗岩岩浆活动和变质作用[J].高校地质学报,2004,10(4):500-513.
- [7] 耿元生,杨崇辉,宋彪,等.吕梁地区18亿年的后造山花岗岩:同位素年代和地球化学制约[J].高校地质学报,2004,10(4):477-487.
- [8] 耿元生,杨崇辉,万渝生.吕梁地区古元古代花岗岩浆作用—来自同位素年代学的证据[J].岩石学报,2006,22(2):305-314.
- [9] 万渝生,耿元生,沈其韩,等.孔兹岩系—山西吕梁地区界河口群的年代学和地球化学[J].岩石学报,2000,16(1):49-58.
- [10] 刘建忠,张福勤,欧阳自远,等.山西吕梁山界河口群变质基性火山岩的地球化学及年代学研究[J].中国科学(D辑),2001,31(2):111-118.
- [11] 翟明国.华北克拉通2.1~1.7 Ga地质事件群的分解和构造意义探讨[J].岩石学报,2004,20(6):1341-1354.
- [12] 翟明国,彭澎.华北克拉通古元古代构造事件[J].岩石学报,2007,23(11):2665-2682.
- [13] ZHAO G C, SIMON A WILDE, SUN M, et al. SHRIMP U-Pb zircon ages of granitoid rocks in the L ü liang Complex: Implications for the accretion and evolution of the Trans-North China Orogen [J]. Precambrian Research. 2008, 160: 213-226.
- [14] ZHAO G C, YIN C Q, GUO J H, et al. Metamorphism of the L ü liang amphibolite: implications for the tectonic evolution of the North China Craton [J]. American Journal of Science. 2010, 310: 1480-1502.
- [15] WANG Z H, WILDE S A, WANG K Y, et al. A MORB-arc basalt-adakite association in the 2.5 Ga Wutai greenstone belt: Late Archean magmatism and crustal growth in the North China Craton [J]. Precambrian Research. 2004, 131: 323-343.
- [16] WILDE S A, ZHAO G C, WANG K Y, et al. First SHRIMP zircon U-Pb ages for Hutuo Group in Wutaishan: further evidence for Palaeoproterozoic amalgamation of North China Craton [J]. Chinese Science Bulletin. 2004, 49: 83-90.
- [17] WILDE S A, CAWOOD P A, WANG K Y, et al. Granitoid evolution in the Late Archean Wutai complex, North China Craton[J]. Journal of Asian Earth Sciences. 2005, 24: 597-613.
- [18] KRÖNER A, WILDE S A, LI J H, et al. Age and evolution of a late Archean to Paleoproterozoic upper to lower crustal section in the Wutaishan/Hengshan/Fuping terrain of northern China[J]. Journal of Asian Earth Sciences. 2005, 24: 577-595.
- [19] 陈斌,刘树文,耿元生,等.吕梁-五台地区晚太古宙-古元古代花岗岩质岩石锆石U-Pb年代学和Hf同位素性质及

- 其地质意义[J]. 岩石学报, 2006, 22(2):296–304.
- [20] 杜利林, 杨崇辉, 任留东, 等. 吕梁地区2.2–2.1 岩浆事件及其构造意义[J]. 岩石学报, 2012, 28(9):2751–2769.
- [21] 杜利林, 杨崇辉, 王伟, 等. 五台地区滹沱群时代与地层划分新认识: 地质学与锆石年代学证据[J]. 岩石学报, 2011, 27(4):1037–1055.
- [22] 刘超辉, 刘福来, 赵国春. 吕梁杂岩界河口群的源区特征及构造背景: 来自锆石 U–Pb 年龄和 Hf 同位素的证据[J]. 岩石学报, 2013, 29(2):517–532.
- [23] 米广尧, 米然, 毛永栋. 云中山地区界河口岩群单颗粒锆石年龄及地质意义[J]. 矿物学报, 2018, (2):176–184.
- [24] LIU J Z, ZHANG F Q, QUYANG Z Y, et al. Geochemistry and chronology of metamorphic mafic volcanic rocks in Jiehekou Group, Lüliang mountains, Shanxi Province[J]. Science in China(series D). 2001, 31(2): 111–118.
- [25] 耿元生, 万渝生, 沈其韩, 等. 吕梁地区早前寒武纪主要地质事件的年代框架[J]. 地质学报, 2000, 74(3):216–223.
- [26] 张兆琪, 薛文彦, 魏云峰, 等. 山西吕梁山北段岩片法填图新尝试[J]. 中国地质, 2004, 31(2):155–160.
- [27] 田辉, 王惠初, 任云伟, 等. 山西云中山–关帝山地区界河口岩群岩石学特征、LA–ICP–MS 锆石 U–Pb 年龄及其归属[J]. 地质通报, 2014, 33(5): 672–683.
- [28] ZHAO G C, SUN M, WILDE S A, et al. Late Archean to Paleoproterozoic evolution of the North China Craton: key issues revisited[J]. Precambrian Res. 2005, 136: 177–202.
- [29] SUN S S, AND MCDONOUGH W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: Implications for mantle composition and processes. In: Saunders A D, Norry M J. (Eds.), Magmatism in the Ocean Basins. Special Publications 42. Geological Society, London, pp. 1989, 313–345.
- [30] INNOCENTI F, AGOSTINI S, VINCENZO G D, et al. Neogene and Quaternary volcanism in Western Anatolia: Magma sources and geodynamic evolution[J]. Marine Geology. 2005, 221: 397–421.
- [31] MULLEN E D. MnO/TiO₂/P₂O₅: A minor element discriminant for basaltic rocks of oceanic environments and its implications for petrogenesis[J]. Earth Planet. Sci. Lett. 1983, 62: 53–63.
- [32] WOOD D A. The application of a Th–Hf–Ta diagram to problems of tectono – magmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lava of the British Tertiary volcanic province[J]. Earth and Planetary Science Letters. 1980, 50 (2):77–97.
- [33] LANGMUIR C H, BENDER J F, BENCE A E. Petrogenesis of basalts from the famous area: Mid – Atlantic Ridge [J]. Earth & Planetary Science Letters, 1977, 36(1):133–156.
- [34] KIEFFER B, ARNDT N, LAPIERRE H, et al. Flood and Shield Basalts from Ethiopia: Magmas from the African Superswell[J]. Journal of Petrology, 2004, 45(4):793–834.
- [35] 吴昌华, 钟长汀. 华北陆台中段吕梁期的 SW–NE 向碰撞晋蒙高级区孔兹岩系进入下地壳的构造机制[J]. 前寒武纪研究进展, 1998, 21(3):28–50.
- [36] 李江海, 钱祥麟, 黄雄南, 等. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程[J]. 岩石学报, 2000, 16(1):1–10.
- [37] CONDIE K C, O’NEILL C, ASTER R C. Evidence and implications for a widespread magmatic shutdown for 250 My on Earth[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2009, 282: 294–298.
- [38] FRENCH J E, HEAMAN L M. Precise U–Pb dating of Paleoproterozoic mafic dyke swarms of the Dharwar craton, India: implications for the existence of the Neoproterozoic supercontinent Sclavia[J]. Precambrian Research, 2000, 183(3): 416–441.
- [39] PARTIN C A, BEKKER A, SYLVESTER P J, et al. Filling in the Juvenile magmatic gap: evidence for uninterrupted Paleoproterozoic plate tectonics[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2014, 388: 123–133.
- [40] PEHRSSON S J, BUCHAN K L, EGLINGTON B M, et al. Did plate tectonics shutdown in the Palaeoproterozoic? A view from the Siderian geologic record[J]. Gondwana Research, 2014, 26(3/4): 803–815.
- [41] 赵娇, 张成立, 郭晓俊, 等. 华北吕梁地区 2.4 Ga A 型花岗岩的确定及地质意义[J]. 岩石学报, 2015, 31(6):1606–1620.
- [42] 翟明国. 中国主要古陆与联合大陆的形成—综述与展望 [J]. 中国科学(地球科学), 2013, 43(10):1583–1606.
- [43] 杨崇辉, 杜利林, 任留东, 等. 河北赞皇地区许亭花岗岩的时代及成因: 对华北克拉通中部带构造演化的制约[J]. 岩石学报, 2011, 27(4):1003–1016.

Redefinition of jiehekou group in Yunzhongshan area, Shanxi Province

KANG Jian-li^{1,2}, WANG Hui-chu^{1,2}, CHEN Feng^{1,2}, ZENG Le^{1,2},

SUN Yi-wei^{1,2}, XIAO Zhi-bin^{1,2}, TIAN Hui^{1,2}

(1. *Tianjin Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;*

2. *North China Center for Geoscience Innovation, Tianjin 300170, China*)

Abstract: Yunzhongshan lies between Wutai area and Lvliang area, which plays an important role in studying tectonic relationship between Wutai complex and Lvliang complex. The metamorphic basement in Yunzhongshan is mainly composed of Neoarchean granitic gneisses and a suit of metamorphosed supracrustal rocks which was called “Jiehekou Group” consisting of quartzite, Bi-leptynite, marble and amphibolite. However, according to field investigation, there are many differences between these metamorphosed supracrustal rocks and the typical Jiehekou Group in Lvliang area. Based on the rock association in this field investigation, these metamorphosed supracrustal rocks are divided into two parts. Ar_3Y (Y represents Yunzhongshan metamorphosed supracrustal rocks) resided in the Neoarchean granitic gneisses contains Bi-leptynite, quartzite, Hb-leptynite, amphibolite and so on. Chronological study of the granitic gneisses shows that the forming age of Ar_3Y is older than ~ 2.5 Ga; Pt_1qz (qz represents quartzite) has a ductile shearing contact with the Neoarchean granitic gneisses, part of which is intruded by late Paleoproterozoic intrusions aging of ~ 1.94 Ga. Pt_1qz consists largely of quartzite, magnetite leptynite, marble and amphibolite. The research of geochronology implies the formation age of Pt_1qz is $1.94\sim 2.14$ Ga. The geochemistry of the metavolcanics rocks in two suits of metamorphosed supracrustal rocks respectively suggest that Pt_1qz was formed in the background of spreading tectonics with the products of passive continental margin and Ar_3Y was developed in an island arc environment of subduction zone.

Key words: Yunzhongshan area; primary Jiehekou group; disintergration; geochronology; tectonic setting

Four stages A-type granitoids in Shandong Province and their implications for tectonic evolution

WANG Bin^{1,2}, SONG Ming-chun^{1*}, ZHOU Jian-bo², DING Zheng-jiang¹,

BAO Zhong-yi¹, LV Jun-yang¹, WANG Shan-shan¹

(1. *Shandong Provincial No. 6 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weihai Shandong 264209, China;*

2. *College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China*)

Abstract: Multi-stage geological tectonic process and multi-geodynamic background lead to the complex tectonic evolution in Shandong Province. Since the Middle Archean, the Shandong area has been characterized by strong magmatic activity, wide distribution of granites, clear evolutionary sequence and diverse formation ages, and is an important geological basis for studying the crustal evolution of the Shandong area. This paper studies the rock assemblage, geological characteristics, geochemical characteristics, genesis, material sources and tectonic setting of the Neoarchean, Neoproterozoic, Triassic and Cretaceous potassic granites in Shandong area. These granites are all A-type granites, which occurred at the end of each crustal movement stage, and are the key markers of crustal evolution and tectonic transition in Shandong area and North China Craton. Among them, the Neoarchean Sishaishan granitoid in Linyi is A_2 -type granite, which belong to the post-orogenic extensional environment granitoids of Archean microcontinent continental or arc-continent collision. Lanshantou granitic gneiss is A_2 -type granites in early stage and A_1 -type granites in late stage, which is a Neoproterozoic non-orogenic extensional granitic gneiss associated with the breakup of the Rodinia supercontinent. The Shidao granitoid in Weihai is A_2 -type granitoid in the post-orogenic extensional environment of the continental collision between the Yangtze plate and the North China Plate in the Triassic. The Cretaceous Laoshan granitoid in Qingdao and Dadian quartz syenite in Rizhao are composed of early A_2 -type and late A_1 -type granites, which are granites in non-orogenic extensional environment and are important markers after the peak stage of craton destruction.

Key words: Shandong province; potassic granite; A-type granitoid; tectonic evolution