

中祁连东段古生代花岗岩的年代学、地球化学特征及其大地构造意义*

雍拥^{1,2} 肖文交¹ 袁超³ 闫臻⁴ 李继亮¹
YONG Yong^{1,2}, XIAO WenJiao¹, YUAN Chao³, YAN Zhen⁴ and LI JiLiang¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2. 中国科学院研究生院地球科学院, 北京 100039

3. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

4. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

1. State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Earth Sciences College, Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

3. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

4. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China

2008-01-18 收稿, 2008-04-02 改回。

Yong Y, Xiao WJ, Yuan Chao, Yan Z and Li JL. 2008. Geochronology and geochemistry of Paleozoic granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 24(4): 855–866

Abstract The Dongjiazhuang and Xindian Plutons are emplaced in Proterozoic metamorphic rocks of the Central Qilian. LA-ICP MS zircon U-Pb data indicate that the emplaced ages of these two plutons are Paleozoic. The plutons are peraluminous, showing characteristics of high K and K/Na, and low Mg, Fe, and Ca. The rocks are enriched in Rb, Th, Pb, LREE and depleted in Ba, Nb, Sr, P, and Ti, with Eu positive anomaly. Their $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ are respectively 0.7129 and 0.7106, and $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ are -6.6 and -5.2. Based on these geochemical characteristics, we conclude that the plutons are S-type granites whose source rocks were metagreywacke, and their tectonic settings belong to syn-collision.

Key words Central Qilian block; S-type granites; Syn-collision; Paleozoic

摘要 位于中祁连中东段的董家庄花岗岩体和新店花岗岩体侵位于高级变质岩中。对其中的锆石所做 LA-ICP MS 定年表明,董家庄岩体和新店岩体的侵位年龄均为古生代。两个岩体均表现出强过铝、高 K、K/Na,低 Mg、Fe、Ca 的主量元素特征,并富集 Rb、Th、Pb 亏损 Ba、Nb、Sr、P、Ti,具有明显的 Eu 负异常和轻稀土富集。 $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_i$ 分别为 0.7129 和 0.7106, $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 分别为 -6.6 和 -5.2。综合研究表明它们为同碰撞的强过铝 S 型花岗岩,源岩为变杂砂岩。

关键词 中祁连; S-型花岗岩; 同碰撞; 古生代

中图法分类号 P588.121; P597.3

其复杂的造山带与盆地相间的地质单元。其中,祁连-昆仑造山带东连秦岭造山带,西接阿尔金-西昆仑造山带,构成了青藏高原北缘的主体部分(许志琴等, 1994; 冯益民等, 1995a, 1995b, 1996; Sobel and Arnaud, 1999; Yin and

1 引言

在我国西北地区的新疆、甘肃和青海地区,出露一套极

* 国家重点基础研究发展规划项目(2007CB411307)、国家杰出青年基金项目(40725009)、国家自然科学基金委重点及面上项目(40523003,0572043)与国家重点基础研究发展规划项目(2001CB409801)联合资助

第一作者简介:雍拥,女,1976年生,博士研究生,构造地质专业, E-mail: yongyong@mail.iggcas.ac.cn

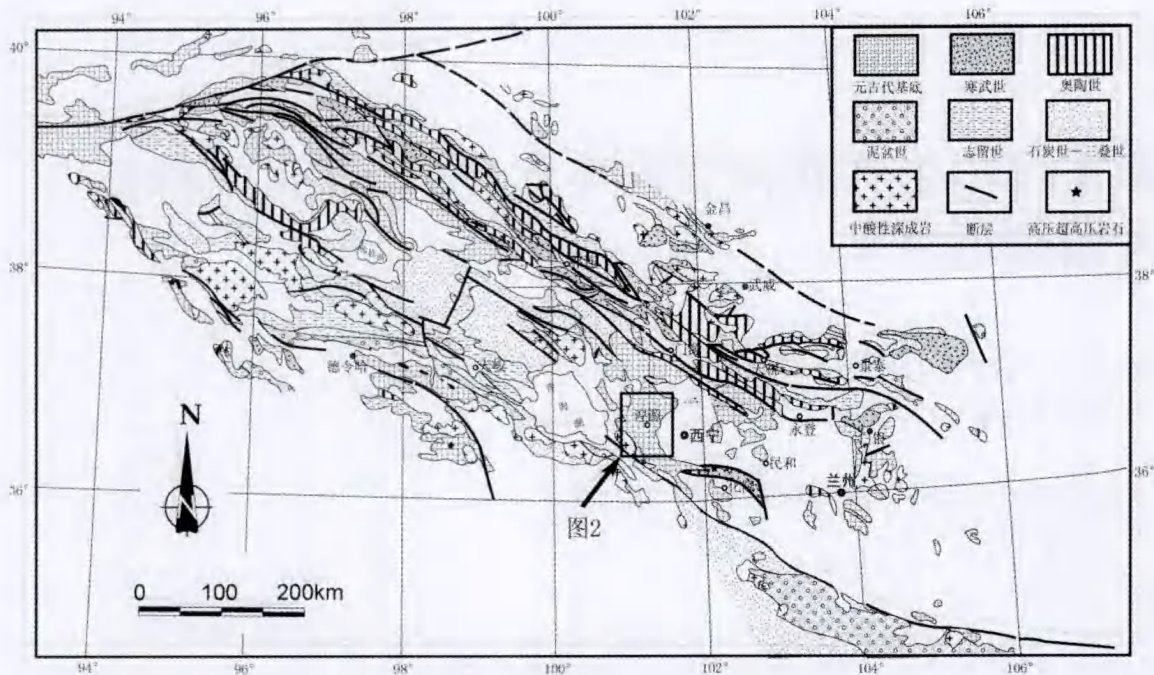


图1 祁连山地区及邻区地质图(据冯益民等,1996)

Fig. 1 Geological map of Qilianshan and its adjacent area (after Feng *et al.*, 1996)

Harrison, 2000; Xiao *et al.*, 2002a; 2002b; 2003; 2005; Yuan *et al.*, 2003; 2005; 张宏飞等, 2006; Song *et al.*, 2006; 董国安等, 2007)。其北部的北祁连是我国最早研究的俯冲带之一, 其早古生代的蛇绿岩、火山岩、高压变质岩及大地构造演化研究, 取得了许多重要进展(王荃等, 1976; 肖序常等, 1978; 吴汉泉等, 1990; 许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1995, 1996; 张旗等, 1997; 宋述光, 1997; 左国朝等, 1997, 1999; 张建新等, 1995, 1997, 1998)。南部的柴北缘最近也成为研究热点, 在其中识别出一条早古生代的超高压变质带(杨建军等, 1994; 杨经绥等, 1998, 2000, 2001, 2003; Song *et al.*, 2006)。位于这两条构造带之间的中祁连则被认为基本上以元古代的基底为主, 出露不同时期的花岗岩。基于这些独特的地质特征, 或认为由南往北为统一的俯冲-碰撞构造演化(Yang *et al.*, 2002; 杨经绥等, 2003; Song *et al.*, 2006), 或强调多地体拼贴过程(许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1995, 1996; 张建新等, 1995, 1997, 1998; Xu *et al.*, 2006)。出现这些不同的看法可能主要是由于中祁连的块体属性与来源还存在不同看法(万渝生等, 2003; 董国安等, 2007)。中祁连以发育有高级变质的湟源群为特征。虽然该地体主要发育元古代的高级变质岩与元古代的花岗质岩石(佟天贵, 1997; 万渝生等, 2003; 郭进京, 1999a, 1999b, 1999c; 张宏飞等, 2006; 董国安等, 2007; 徐旺春等, 2007), 但同时也有蛇绿岩和古生代的花岗岩(左国朝等, 1997, 1999; 邱家骧等, 1998)。本文报道中祁连东段的两个古生代的花岗岩年代学和岩石地化研究结果, 以期进一步探讨古生代中祁连与青藏高原北缘构造带的关系。

2 区域地质及岩相学特征

董家庄岩体位于青海省湟源县城东南 1 km 里处, 近似椭圆形, 长轴方向为南北向, 长约 4 km, 宽约 2 km, 出露面积约为 12 km²。岩体侵位于湟源群东岔沟组中, 东岔沟组为一套震旦系的灰色-灰黑色含石榴子石的云母石英片岩、二云母石英片岩及石墨化片岩夹石英角闪片岩、石英透闪片岩及数层透镜状大理岩和石英岩。该岩体被南响河谷中新代沉积物分为东西两部分, 其西部被第四系的沉积物不整合。董家庄岩体节理发育, 局部遭受弱的片麻化。前人对该岩体的研究较少, 仅限于区域地质填图, 未有明确的同位素年代学数据, 仅根据其空间分布、岩性特征、侵位关系与绝对年龄为 442 Ma 的兰加岩体一致, 也将其定为奥陶纪末期产物(青海省地质局区域地质测量队, 1965)。董家庄岩体呈灰白色, 块状构造, 中粒花岗结构。镜下观察其矿物组合, 以斜长石(30%~35%)、碱性长石(25%~35%)、石英(20%~30%)为主, 暗色矿物主要为黑云母(10%), 同时有少量白云母(<5%)。斜长石为自形-半自形, 有的具环带构造。碱性长石以半自形的微斜长石为主。副矿物为锆石、磷灰石、金红石等。

新店岩体位于青海省海晏县东 4 km 左右处, 侵位于湟源群石英岩、千枚岩及元古代花岗岩中, 其上被第三系沉积物不整合。上述元古代花岗岩的侵位年龄为 $846 \pm 2 \text{ Ma}$ (雍拥, 2008)。新店岩体呈不规则的圆形, 出露面积约为 110 km²,

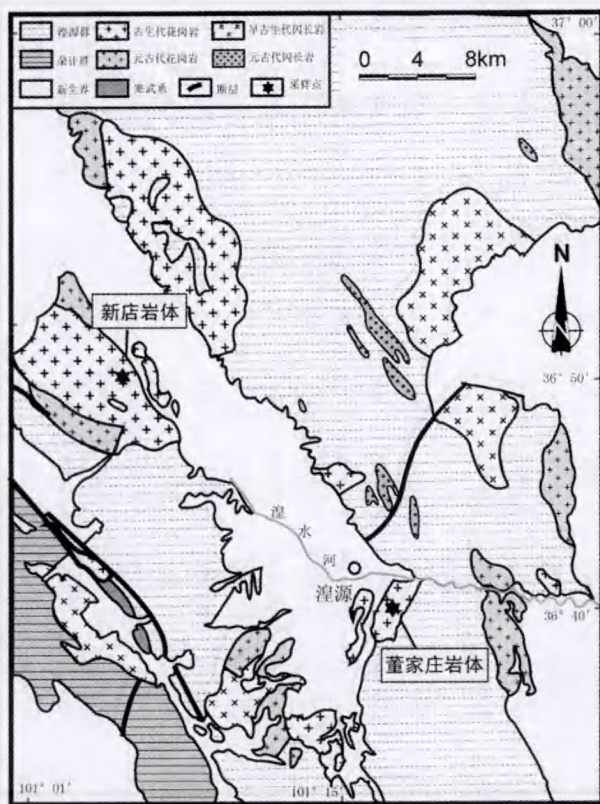


图2 中祁连东段湟源地区地质图(据青海省地质局区域地质测量队,1965)

Fig.2 Geological sketch map of the Huangyuan area (after the Regional and Geological Survey Team of Qinghai Province, 1965)

沿湟水河谷被新生代沉积物覆盖,从而被分成南、北两部分。岩体中围岩捕虏体较多,有石榴子石云母片岩、石英岩、闪长岩和片麻状花岗岩。岩体边缘的接触变质不明显。该岩体曾报道有 394 Ma 的绝对年龄(青海省地质矿产局,1991),但未有详细的描述。新店岩体具中粒等粒结构,含斜长石(30%~35%)、碱性长石(30%)、石英(20%~30%),与董家庄岩体相比,黑云母含量较低(<5%),且基本不含白云母。斜长石多数已遭绢云母化,并有明显的环带构造。

3 分析方法

样品在铸铁材料的压机上压碎,筛选出 20~40 目之间的颗粒,再用玛瑙研钵磨至 200 目。

主量元素在中国科学院地质与地球物理研究所完成。测试方法采用 X-射线荧光光谱法(XRF)。将 0.6g 样品用玛瑙研钵研细,加入适量四硼酸锂后高温熔融制成玻璃片,在 Shimadzu XRF-1700/1500 仪器上采用外标法测定氧化物的含量,分析误差 <5%。

微量元素也在中国科学院地质与地球物理研究所完成。测试方法采用 LA-ICP MS 法。称取 40mg 样品用酸溶法制成溶液后,在 LA-ICP MS Element II 上测定微量元素的含量。元素含量 >10 $\mu\text{g/g}$ 的精度优于 5%, <10 $\mu\text{g/g}$ 的精度优于 10%。

锆石的阴极发光照片在中国科学院地质与地球物理研究所矿产资源重点实验室的 Cameca 电子探针仪器上完成,分析电压为 50KV,电流为 15nA。锆石的 U-Pb 年龄测试在西北大学地质系大陆动力实验室完成。采用的仪器为 Perkin Elmer/SCIEX 公司生产的四极杆 LA-ICP MS 仪器 Elan6100DRC,在标准模式下工作。激光剥蚀系统采用德国 MicroLas 公司的 GeoLas2000M,剥蚀半径为 30 μm 。采样方式为单点剥蚀,数据采集选用跳峰方式。精度分析依照袁洪林等(2003)。

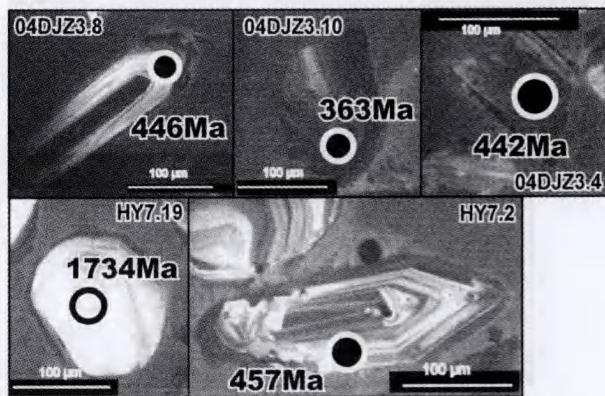


图3 中祁连早古生代花岗岩体锆石阴极发光(CL)图像
Fig.3 Representative CL image of zircons from the Dongjiazhuang and Xindian Plutons

4 测试结果

4.1 锆石 U-Pb 年代学

董家庄岩体 04DJZ3 的锆石颗粒大小不一,多数为中等颗粒,偶有一两颗 0.5 mm 左右的大晶体,另有一些细小的颗粒。从测试结果来看,颗粒的大小与不同的年龄数据没有直接关系。多数晶形相对完好,颜色以无色-极浅色为主。大部分锆石颗粒成短柱状,长宽比多为 2:1。从 CL 图像看,董家庄岩体的锆石大致可分为三类:第一类数量最多,表现为有清晰的振荡型岩浆生长环带,CL 图像很亮,在最外部有一圈暗色边(图 3a,b);第二类锆石数量不多,与第一类的区别主要表现为呈面状分带(图 3c,d);第三类锆石比较少,其颗粒大于前两类,CL 图像很暗,但也有比较清楚的分带(图 3e,f)。

从表 1 中可以看出,董家庄岩体的锆石 U-Pb 年龄数据比较复杂,多个分析点的普通铅含量过高($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 为 2~57),导致这些点的年龄数据偏离谐和曲线。造成这种结果

表 1 董家庄岩体和新店岩体锆石 U-Pb LA-ICPMS 年龄测定结果
Table 1 Zircon U-Pb LA-ICPMS data for the Dongjiazhuang and Xindian Plutons

点号	组成 ($\mu\text{g/g}$)				比值												年龄 (Ma)			
	Pb (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U (ppm)	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{232}\text{Th}$	$^{206}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	1σ	1σ	1σ		
DJZ3.1	665	555	1623	0.34	5	0.0565	0.00573	0.37806	0.03824	0.04853	0.00036	0.01509	0.00075	472	231	326	28	305	2	
DJZ3.2	48	38	153	0.25	88	0.05654	0.0008	0.5578	0.00616	0.07154	0.00037	0.02748	0.00048	474	15	450	4	445	2	
DJZ3.3	136	87	386	0.23	191	0.05742	0.00073	0.63877	0.00589	0.08066	0.0004	0.02871	0.00045	508	12	502	4	500	2	
DJZ3.4	238	417	736	0.57	245	0.054	0.00073	0.52855	0.00537	0.07097	0.00036	0.02446	0.00029	371	14	431	4	442	3	
DJZ3.5	54	49	170	0.29	122	0.05378	0.00074	0.53932	0.00564	0.07271	0.00037	0.02454	0.00039	362	15	438	4	452	2	
DJZ3.7	397	596	1185	0.5	13	0.11417	0.00121	0.97188	0.00592	0.06172	0.00029	0.04492	0.00036	1867	5	689	3	386	2	
DJZ3.8	177	88	570	0.15	167	0.05536	0.00083	0.54637	0.00665	0.07156	0.00039	0.02752	0.00066	427	17	443	4	446	2	
DJZ3.9	378	280	1269	0.22	182	0.05616	0.00068	0.52372	0.00435	0.06761	0.00032	0.02726	0.00036	459	10	428	3	422	2	
DJZ3.10	309	133	1240	0.11	866	0.05383	0.00057	0.43031	0.00264	0.05796	0.00026	0.02344	0.00028	364	7	363	2	363	2	
DJZ3.11	49	49	149	0.33	44	0.06189	0.00146	0.60329	0.01293	0.07069	0.00052	0.0289	0.00088	670	33	479	8	440	3	
DJZ3.12	49	36	156	0.23	118	0.05389	0.00116	0.53381	0.01033	0.07182	0.00048	0.02362	0.0008	366	31	434	7	447	3	
DJZ3.13	182	240	517	0.46	32	0.07694	0.00084	0.77161	0.00499	0.07272	0.00034	0.03272	0.00029	1120	6	581	3	453	2	
DJZ3.14	40	30	123	0.24	31	0.0543	0.00124	0.53374	0.0111	0.07127	0.0005	0.02404	0.00086	384	34	434	7	444	3	
DJZ3.15	105	71	331	0.21	232	0.05405	0.00074	0.53605	0.00555	0.07192	0.00036	0.02473	0.00045	373	14	436	4	448	2	
DJZ3.16	224	223	592	0.38	23	0.08716	0.00101	0.91353	0.00686	0.076	0.00037	0.04413	0.00046	1364	7	659	4	472	2	
DJZ3.17	2061	187	1115	0.17	2	0.44461	0.00437	11.28054	0.05137	0.18398	0.00084	1.31159	0.00922	4067	3	2547	4	1089	5	
DJZ3.18	803	258	3165	0.08	39	0.07705	0.00095	0.57693	0.00496	0.05429	0.00027	0.06796	0.00106	1122	10	462	3	341	2	
DJZ3.19	150	125	465	0.27	110	0.05795	0.00066	0.57139	0.00419	0.0715	0.00033	0.02717	0.00031	528	8	459	3	445	2	
DJZ3.20	97	73	301	0.24	136	0.05478	0.0007	0.5401	0.00495	0.0715	0.00035	0.02567	0.00039	403	12	438	3	445	2	
DJZ3.21	431	187	1325	0.14	19	0.0964	0.00099	0.86104	0.00458	0.06477	0.00029	0.08089	0.00066	1556	4	631	2	405	2	
DJZ3.22	311	242	740	0.33	6	0.18883	0.00208	1.69486	0.011	0.06509	0.00032	0.10073	0.00092	2732	5	1007	4	407	2	
DJZ3.23	582	188	1727	0.11	13	0.11475	0.0012	1.00681	0.00567	0.06363	0.00029	0.13149	0.00115	1876	5	707	3	398	2	
DJZ3.24	124	100	385	0.26	170	0.05514	0.00073	0.54532	0.00537	0.07172	0.00036	0.02589	0.00041	418	13	442	4	447	2	
DJZ3.25	1156	682	4804	0.14	124	0.05974	0.00063	0.43789	0.00258	0.05315	0.00024	0.03067	0.0003	594	6	369	2	334	1	
DJZ3.26	410	65	812	0.08	21	0.10346	0.00111	1.44209	0.00884	0.10107	0.00047	0.17994	0.00197	1687	5	907	4	621	3	
DJZ3.27	1018	724	3120	0.23	283	0.05622	0.00079	0.55569	0.00595	0.07168	0.00037	0.03335	0.00055	461	15	449	4	446	2	
DJZ3.28	89	60	253	0.24	57	0.05914	0.00087	0.61252	0.00718	0.07511	0.0004	0.03763	0.00066	572	16	485	5	467	2	
DJZ3.29	113	79	345	0.23	134	0.05608	0.0008	0.55618	0.00616	0.07192	0.00037	0.03024	0.00055	456	15	449	4	448	2	
DJZ3.30	877	507	2302	0.22	5	0.04605	0.00259	0.25989	0.01459	0.04094	0.00018	0.02072	0.00203		122	235	12	259	1	

点号	组成(μg/g)				比值				年龄(Ma)										
	Pb(ppm)	Th(ppm)	U(ppm)	Th/U	²⁰⁶ Pb/ ²⁰⁴ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ				
	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ	1σ				
HY 岩体																			
HY7.1	37	50	99	0.51	26	0.05344	0.00143	0.54347	0.01356	0.07375	0.00056	0.02477	0.00054	348	43	441	9	459	3
HY7.2	498	96	1133	0.08	181	0.06217	0.0007	0.79385	0.00806	0.0926	0.00044	0.02848	0.00028	680	25	593	5	571	3
HY7.3	181	56	63	0.89	96	0.18051	0.0023	12.58063	0.12523	0.50543	0.00369	0.15514	0.00197	2658	8	2649	9	2637	16
HY7.4	115	136	324	0.42	84	0.05592	0.0009	0.56273	0.00749	0.07298	0.0004	0.02652	0.00035	449	20	453	5	454	2
HY7.5	706	90	322	0.28	409	0.14438	0.00129	8.44825	0.06182	0.42438	0.00217	0.11943	0.00063	2280	16	2280	7	2280	10
HY7.6	52	63	144	0.44	34	0.05446	0.00132	0.54898	0.01221	0.07311	0.00052	0.02497	0.00051	390	37	444	8	455	3
HY7.7	748	323	688	0.47	665	0.09889	0.00105	2.91118	0.01706	0.2135	0.00099	0.08589	0.00069	1603	5	1385	4	1247	5
HY7.8	675	1672	2075	0.81	102	0.06389	0.00076	0.57037	0.00449	0.06475	0.0003	0.01801	0.00015	738	9	458	3	404	2
HY7.9	587	2127	2228	0.95	165	0.0578	0.00096	0.41267	0.00571	0.05178	0.00029	0.01534	0.00017	522	20	351	4	325	2
HY7.10	809	2575	3131	0.82	224	0.05783	0.00077	0.41553	0.00407	0.05211	0.00026	0.01374	0.00013	523	13	353	3	327	2
HY7.11	349	578	1710	0.34	29	0.06221	0.00117	0.33918	0.00615	0.03954	0.0002	0.01216	0.00008	681	41	297	5	250	1
HY7.12	124	214	317	0.68	9	0.05588	0.00427	0.55753	0.04162	0.07235	0.0014	0.02365	0.00128	448	132	450	27	450	8
HY7.13	147	280	451	0.62	129	0.0578	0.0009	0.5238	0.0066	0.06572	0.00035	0.02257	0.00025	522	18	428	4	410	2
HY7.14	143	208	404	0.52	81	0.05663	0.00103	0.56601	0.0089	0.07249	0.00043	0.02343	0.00034	477	24	455	6	451	3
HY7.15	259	93	161	0.58	203	0.1072	0.0013	4.66016	0.03918	0.31527	0.00174	0.09401	0.00101	1752	8	1760	7	1767	9
HY7.16	20	20	55	0.37	11	0.05667	0.00252	0.56332	0.02413	0.07209	0.00086	0.02175	0.00099	479	74	454	16	449	5
HY7.17	389	737	1539	0.48	33	0.06254	0.00123	0.41512	0.00786	0.04814	0.00025	0.0148	0.00008	693	43	353	6	303	2
HY7.18	888	2490	2665	0.93	173	0.05844	0.00074	0.52511	0.0047	0.06517	0.00031	0.0204	0.00017	546	11	429	3	407	2
HY7.19	125	39	78	0.49	99	0.10616	0.00142	4.58742	0.047	0.31341	0.00193	0.09162	0.00125	1734	10	1747	9	1757	9
HY7.20	674	298	1118	0.27	196	0.0728	0.00085	1.27235	0.00962	0.12676	0.0006	0.0351	0.00039	1008	8	833	4	769	3
HY7.21	776	89	756	0.12	746	0.09517	0.00072	2.79652	0.0172	0.21311	0.00095	0.06255	0.00032	1532	15	1355	5	1245	5
HY7.22	799	2107	2594	0.81	102	0.06266	0.00072	0.5268	0.00385	0.06097	0.00028	0.01817	0.00014	697	8	430	3	382	2
HY7.23	133	201	370	0.54	62	0.05775	0.00136	0.58474	0.01256	0.07344	0.00053	0.02176	0.00042	520	34	468	8	457	3
HY7.24	341	44	217	0.2	238	0.11039	0.00108	4.87999	0.04037	0.32062	0.00166	0.09268	0.00046	1806	18	1799	7	1793	8
HY7.25	325	365	1312	0.28	269	0.05647	0.00069	0.41018	0.00461	0.05268	0.00025	0.01639	0.00007	471	28	349	3	331	2

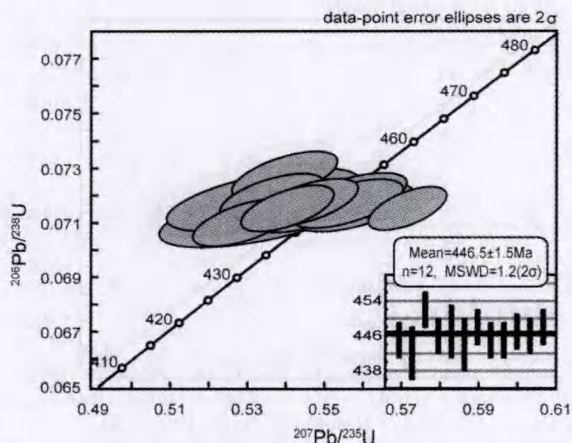


图4 董家庄岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 4 U-Pb Concordia diagram of zircon from the Dongjiazhuang Pluton

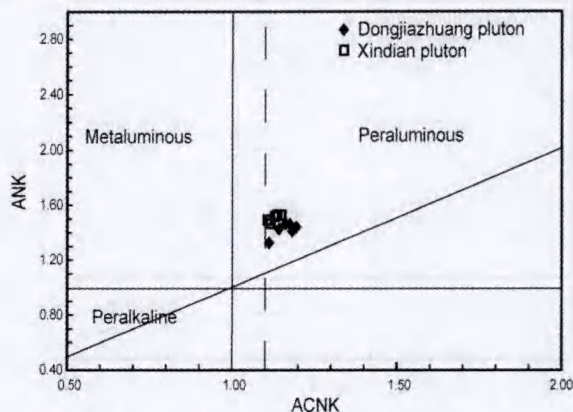


图6 中祁连早古生代花岗岩体 ASI 图解
Fig. 6 ASI diagram of Dongjiazhuang and Xindian Plutons

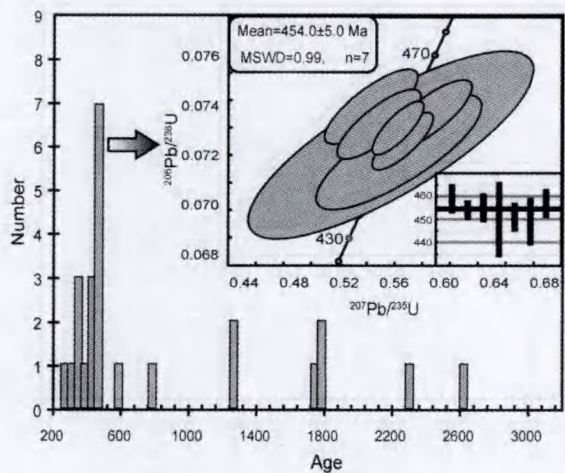


图5 新店岩体锆石 U-Pb 年龄谐和图
Fig. 5 U-Pb Concordia diagram of zircon from Xindian Pluton

的原因可能是因为多数样品颗粒较小,且锆石结构复杂,不少有裂缝和包裹体,或是有老锆石的残核,直径为 30 μ m 的激光束斑无法完全避开这些区域。如样品 04DJZ3.17 就属这种情况,其极高的普通铅含量($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 2$)表明有非放射性成因的铅混入,因而其年龄没有意义。剩下的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄较为一致的样品,与其 CL 图像对应,第一类锆石和第二类锆石的年龄集中在 445 Ma 左右,12 个样品得到 446 ± 1 Ma (MSWD = 0.53) 的加权平均年龄,我们认为该年龄代表了岩体的侵位年龄(图 4)。第三类锆石的年龄明显年轻,两个样品的年龄分别为 363Ma 和 334Ma。由于这类锆石数量很少,从锆石形态上看表现为岩浆锆石,其年龄可能反应了一次岩浆事件,但更多的信息还需要更详细的工作和更丰富的数据。

新店岩体的测试样品 HY7 锆石颗粒中等,以柱状为主,长短比变化不一,从 4 : 1 到 2 : 1 均可见到。晶形多为半自型-自型。有少数锆石具它形,磨圆度良好,可能反应其源自古老沉积物。CL 图像显示 HY7 锆石的内部结构非常复杂(图 3): 大多数锆石都具有明显的核-幔-边构造,反应了这些锆石经历多期生长的信息。核部 CL 图像较亮,分带不明显;幔部则有明显的振荡型环带;最外围为一圈 CL 图像很暗的增生边。

从表 1 及图 5 中可以看出,新店岩体的锆石 U-Pb 年龄变化范围很大,较为集中的年龄在 450Ma 左右,7 个样品的加权平均年龄为 454 ± 5 Ma。这 7 个样品的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 和 $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ 年龄相对较为一致,且多数打在具振荡环带的幔部,因而这个年龄可能代表了新店岩体的侵位年龄(图 3g, h)。新店岩体也记录了古老的年龄信息: 前述 3 个磨圆度良好的锆石得出了 1.7Ga 左右的年龄(图 3i, j); 而在具核幔结构的锆石的核部中得到 2.3 Ga 和 2.6 Ga 的年龄,表明它们来自继承锆石的残留核(图 3k)。另外,我们也注意到,新店岩体中也有 300Ma 左右的年轻年龄信息。综合 CL 图像和 LA-ICPMS 测年结果,这些年龄可能反应了岩体在成岩后经历了多期构造热事件。如样品 HY7.18, 其 CL 图像明显较其他样品暗,说明它含有更多的 U、Th 等元素(吴元保, 2004), Th/U = 0.93, 接近 1, 表明它也很可能是岩浆锆石,其 407Ma 的年龄则可能是该次岩浆事件的记录(图 3l)。其它更年轻的样品都是打在锆石幔部与边部的结合部位,代表了两次事件之间的混合年龄。由于这种边部较窄,往往小于激光束斑,所以这一次热事件的具体年龄难以识别。样品 HY7.11 与其它样品又有不同,CL 图像显示它没有核幔构造,呈现一般岩浆锆石所不具有的面状分带,它有可能是一颗具复杂成因的锆石。类似的样品太少,所以无法判断其年龄意义(图 3m)。

表2 董家庄岩体和新店岩体主量、微量元素分析结果

Table 2 Major and trace elements data of the Dongjiazhuang and Xindian Plutons

Sample	04DJZ1	04DJZ3	04DJZ5	04DJZ7	04DJZ9	04DJZ11	HY-6	HY-7	HY-8	HY-9	HY-10	HY-11
Major elements												
SiO ₂	71.59	73.42	72.51	73.39	73.92	73.19	73.15	71.98	73.26	71.91	72.41	71.97
TiO ₂	0.13	0.17	0.19	0.19	0.16	0.20	0.28	0.35	0.25	0.31	0.30	0.26
Al ₂ O ₃	14.93	14.34	14.54	14.18	14.19	13.95	14.03	14.26	14.09	14.48	14.17	14.7
FeO ^T	1.03	1.39	1.63	1.65	1.29	1.76	1.85	2.44	1.69	2.17	2.05	1.79
MnO	0.04	0.05	0.06	0.05	0.04	0.06	0.04	0.06	0.04	0.05	0.05	0.04
MgO	0.40	0.49	0.55	0.59	0.45	0.62	0.62	0.77	0.57	0.76	0.71	0.60
CaO	1.19	1.13	1.40	1.30	1.07	1.36	1.75	1.69	1.81	1.79	1.77	1.73
Na ₂ O	3.03	2.91	3.14	3.01	3.06	3.03	2.90	3.05	3.01	3.25	3.07	3.01
K ₂ O	5.80	4.77	4.64	4.39	4.64	4.20	4.12	3.98	4.15	3.81	4.11	4.68
P ₂ O ₅	0.08	0.08	0.08	0.10	0.09	0.08	0.10	0.13	0.10	0.12	0.11	0.11
LOI	1.35	0.92	0.98	0.98	0.97	1.22	0.88	1.02	0.78	1.28	0.98	0.83
TOTAL	99.56	99.67	99.72	99.83	99.89	99.67	99.72	99.72	99.75	99.93	99.74	99.72
ACNK	1.11	1.19	1.14	1.17	1.18	1.16	1.13	1.15	1.11	1.14	1.11	1.12
ANK	1.33	1.44	1.43	1.46	1.41	1.46	1.52	1.53	1.49	1.53	1.49	1.47
Trace elements												
Li	71.3	107	105	119	108	110	79.5	103	77.4	71.3	93.2	79.7
Be	4.63	4.66	4.97	4.16	4.15	5.30	4.74	4.77	4.80	4.82	4.85	4.88
Sc	4.67	5.79	6.36	6.49	5.59	6.86	7.01	7.31	7.61	7.91	8.21	8.52
V	11.1	16.5	17.7	18.4	14.9	19.7	21.9	28.4	21	24.9	24.6	22.1
Cr	2.37	7.23	8.77	5.85	15.0	8.81	7.19	8.17	22.2	14.1	10.5	0.46
Co	1.82	2.41	2.86	2.82	1.86	3.14	3.13	3.82	3.02	3.88	3.47	3.13
Ni	7.57	0.53	34.7	1.32	1.71	512	2.54	2.23	5.43	21.16	3.08	1.44
Cu	7.91	2.97	15.3	3.10	4.21	188	6.52	8.56	7.70	13.11	5.01	2.23
Zn	18.5	28.9	29.0	31.1	30.9	46.1	40.4	42.9	31.7	38.4	36.9	32.1
Ga	15.1	16.9	17.5	17.5	17.3	18.0	18.8	20.4	19.1	21.0	19.8	19.3
Rb	266	238	238	220	274	238	181	188	197	197	189	196
Sr	167	166	188	158	147	185	220	213	226	231	223	227
Zr	85	101	110	111	85	108	125	137	131	134	130	129
Nb	8.85	12.3	12.0	14.5	13.8	13.2	15.6	19.1	14.4	19.0	16.9	15.1
Cs	17.2	17.9	14.9	17.9	17.7	16.3	9.9	14.3	10.2	12.2	10.7	9.92
Ba	572	502	492	475	401	440	497	459	497	483	504	597
Hf	2.93	3.91	4.09	4.18	3.07	4.13	4.44	5.09	4.55	4.08	4.54	4.53
Ta	1.56	2.31	2.09	2.59	2.55	2.34	2.28	2.75	2.16	2.40	2.34	2.30
Tl	2.07	2.12	1.99	2.08	1.88	1.98	1.44	1.48	1.39	1.25	1.45	1.63
Pb	42.8	45.0	37.4	37.7	36.1	37.4	39.7	37.8	41.3	38.5	38.7	42.7
Bi	1.08	1.38	0.82	1.22	1.35	0.97	0.24	0.16	0.12	0.18	0.16	0.17
Th	13.8	22.8	20.3	24.4	17.6	24.7	26.8	31.7	25.9	24.9	27.3	27.2
U	4.55	2.96	4.29	3.46	2.45	4.44	4.33	3.31	4.69	4.96	3.69	4.11
REE												
La	19.7	27.1	30.3	32.3	26.4	30.6	41.1	47.4	40.9	44.1	42.2	40.2
Ce	35.3	49.5	53.9	57.4	50.0	57.6	75.6	88.2	76.5	87.6	77.0	72.3
Pr	4.41	6.43	6.68	7.12	5.44	7.10	9.59	11.0	9.46	10.06	9.72	9.44
Nd	15.9	23.4	24.5	26.2	21.1	25.6	33.6	39.0	33.8	34.0	35.4	33.8
Sm	3.19	4.65	4.78	5.29	4.28	5.20	5.75	6.86	5.92	6.05	6.09	5.97
Eu	0.62	0.66	0.66	0.65	0.56	0.62	0.81	0.84	0.84	0.80	0.83	0.84
Gd	3.20	4.29	4.27	4.76	3.75	4.95	4.92	5.57	4.92	4.69	5.03	4.85
Tb	0.47	0.68	0.68	0.78	0.68	0.83	0.71	0.81	0.69	0.71	0.69	0.70
Dy	2.97	4.13	3.90	4.67	3.94	5.09	3.65	4.34	3.75	3.47	3.75	3.85
Ho	0.57	0.80	0.73	0.88	0.76	0.99	0.67	0.79	0.69	0.66	0.68	0.71
Er	1.63	2.24	2.03	2.47	2.17	2.80	1.83	2.07	1.84	1.76	1.83	1.96
Tm	0.25	0.36	0.30	0.39	0.34	0.42	0.28	0.32	0.28	0.27	0.28	0.30
Yb	1.63	2.21	1.93	2.51	2.17	2.73	1.72	1.97	1.78	1.72	1.73	1.88
Lu	0.25	0.33	0.29	0.38	0.32	0.41	0.26	0.29	0.26	0.24	0.25	0.26
Y	17.0	20.2	20.0	23.5	20.9	26.5	17.6	20.3	18.1	18.6	17.5	18.4
ΣREE	107	147	155	169	143	171	198	230	200	215	203	195
(La/Yb) _N	8.15	8.26	10.585	8.69	8.22	7.55	16.1	16.2	15.5	17.3	16.5	14.4
δEu	0.59	0.45	0.45	0.40	0.42	0.37	0.46	0.41	0.48	0.46	0.46	0.48

4.2 地球化学

4.2.1 主量元素

董家庄花岗质岩体和新店花岗质岩体的主量元素和微量元素分析结果列于表2。董家庄岩体和新店岩体的 SiO_2 含量高且变化范围较窄(71.59% ~ 73.92%), 相对含有较高的 K_2O (3.81% ~ 5.80%)、 Al_2O_3 (13.95% ~ 14.93%)、 K/Na (1.17 ~ 1.91), 以及较低的 Fe_2O_3 (1.03% ~ 2.44%)、 MgO (0.40% ~ 0.77%)、 CaO (1.07% ~ 1.81%)。这两个岩体都表现出强过铝质的特征 ($\text{ASI} = 1.11 \sim 1.19$) (图6); 与其高钾的特征(大部分样品的 K_2O 接近5%)相比, 钠含量相对较低(除了一个样品的 Na_2O 为3.25%外, 其余样品的 $\text{Na}_2\text{O} < 3.2\%$; P_2O_5 含量较低且变化不大(0.08% ~ 0.13%)。这些主量元素的特征均与S型花岗岩的主量元素特征一致(Chappell and White, 1974; 1992, 2001; 邱家骧, 1991; 李献华, 2007)。

4.2.2 微量元素

董家庄岩体具有稍高的稀土总含量($\sum \text{REE} = 107 \text{ppm} \sim 171 \text{ppm}$), 轻稀土富集($(\text{La}/\text{Yb})_N = 7.55 \sim 10.56$), 具较明显的Eu负异常($\delta \text{Eu} = 0.37 \sim 0.59$)。新店岩体的总稀土含量明显高于董家庄岩体($\sum \text{REE} = 195 \text{ppm} \sim 230 \text{ppm}$), 更富集轻稀土($(\text{La}/\text{Yb})_N = 14.43 \sim 17.31$), Eu负异常则与之相当($\delta \text{Eu} = 0.41 \sim 0.48$)。较高的轻重稀土比和明显的Eu负异常表明其源区应残留斜长石。两者的轻、中稀土都呈较缓的右倾趋势, $(\text{La}/\text{Sm})_N = 3.71 \sim 4.59$, 表明存在比较明显的轻稀土分馏; 重稀土分馏较小($(\text{Gd}/\text{Yb})_N = 1.41 \sim 2.35$), 显示源区中不存在明显的石榴石残留(图7)。从以原始地幔标准化的微量元素蛛网图上可以看出, 董家庄岩体和新店岩体基本上都表现出一致的分布形式, 富集Rb、Th、Pb等元素, 而亏损Ba、K、Nb、Sr、P、Ti等元素, 具有S型花岗岩的特征(图8)。

4.2.3 同位素

董家庄岩体和新店岩体的Sr-Nd同位素组成列于表3中。两个岩体都具有较高的Sr初始比(0.7129和0.7106)及较低的 $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ 值(-6.6和-5.2), 说明其源区的贡献应以地壳物质为主。其单阶段模式年龄 T_{DM} 为1.89和1.55Ga, 两阶段模式年龄 $T_{2\text{DM}}$ 为1.71和1.61Ga。由于难以确定样品从地幔分离出来以后, 是否经历了Sm-Nd体系的分异, 两阶段模式年龄更能代表样品的壳幔分异年龄。也即在中元古代晚期中祁连地区存在一期地壳生长事件。

5 讨论

5.1 年代学

董家庄岩体和新店岩体均可能为古生代的产物。从以上两个岩体的锆石U-Pb年龄可以看出, 中祁连地区奥陶纪花岗岩中的锆石经历了多期的生长。岩体侵位年龄为奥陶

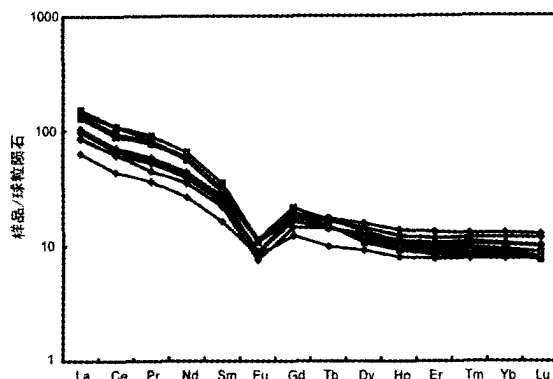


图7 中祁连早古生代花岗岩体稀土元素球粒陨石标准化配分图(球粒陨石标准值引自Boynnton, 1984)。样品图例与图6同。

Fig. 7 Chondrite-normalized REE patterns for Dongjiashuang and Xindian Plutons (The chondrite values after Boynnton, 1984)

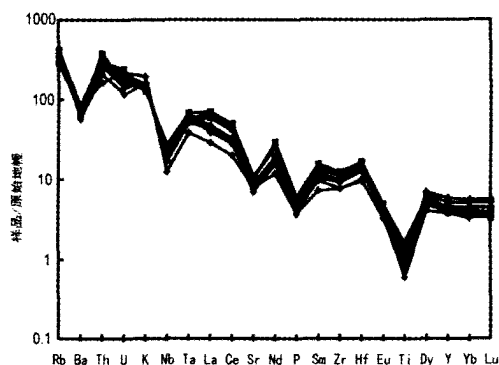


图8 中祁连早古生代花岗岩体微量元素蛛网图(原始地幔标准值引自Sun & McDonough, 1989)。样品图例与图6同。

Fig. 8 Primitive mantle-normalized spider diagrams for the Dongjiashuang and Xindian Plutons (The PM values after Sun & McDonough, 1989)

纪($446 \pm 1 \text{ Ma}$ 和 $454 \pm 5 \text{ Ma}$, 但可能也包含了更年轻的岩浆事件的记录(363Ma、334Ma、407Ma)。同时, 新店岩体还有2.2Ga和2.6Ga的继承锆石的残核, 指示其源区也应包含这种古老的锆石。而1.7Ga的锆石来自晶形单一的浑圆颗粒, 可能是岩体侵位过程中捕获的碎屑锆石。董国安等(2007)对中祁连变质基底中的岩浆锆石和碎屑锆石所做SHRIMP测试也表明除新元古代的岩浆事件外, 上述三个时代的年龄均有清晰记录。此外, 本次工作得到董家庄岩体和新店岩体的两阶段模式年龄($T_{2\text{DM}}$)为1.71和1.61Ga; 万渝生等(2003)和张宏飞等(2006)对湟源群所做的Nd同位素研究表明, 其中的花岗质片麻岩的模式年龄 T_{DM} 集中在1.7Ga左右; 其它变质岩(变沉积岩和变基性岩)的 T_{DM} 则集中在2.1Ga。

表3 董家庄岩体和新店岩体 Sr-Nd 同位素测试结果

Table 3 Sr-Nd isotope data for the Dongjiazhuang and Xindian Plutons

样品号	⁸⁷ Rb/ ⁸⁶ Sr	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	¹⁴⁷ Sm/ ¹⁴⁴ Nd	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	$\epsilon_{Sr}(0)$	$\epsilon_{Sr}(t)$	$f_{Rb/Sr}$	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr _i	$\epsilon_{Nd}(0)$	$\epsilon_{Nd}(t)$	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd _i	$f_{Sm/Nd}$	T _{DM}	T _{2DM}
DJZ3	4.9574	0.744329	0.1298	0.512106	565.4	126.8	58.9	0.712904	-10.4	-6.6	0.511727	-0.34	1895	1717
HY7	3.0546	0.730332	0.1132	0.512123	366.7	93.9	35.9	0.710576	-10.0	-5.2	0.511786	-0.42	1558	1613

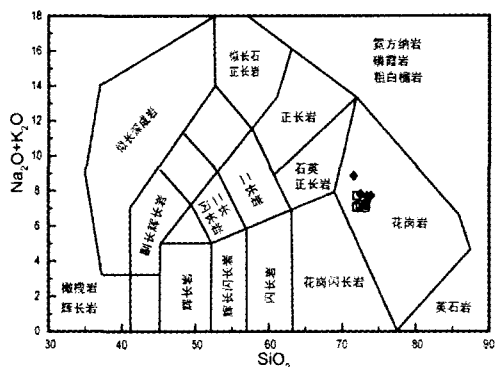


图9 中祁连早古生代花岗岩体 TAS 图解(据 Middlemost, 1994)。样品图例与图 6 同。

Fig. 9 TAS diagram of Dongjiazhuang and Xindian Plutons (after Middlemost, 1994)

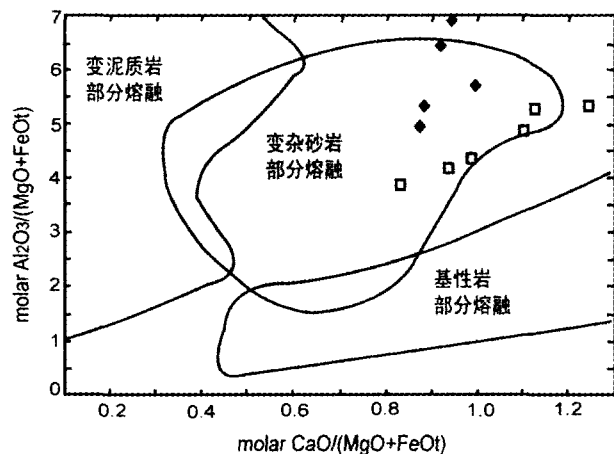


图10 中祁连早古生代花岗岩体 A/MF - C/MF 摩尔比值图(据 Alther, 2000)。样品图例与图 6 同。

Fig. 10 A/MF - C/MF diagram of Dongjiazhuang and Xindian Plutons (after Alther, 2000)

5.2 源岩和构造环境

董家庄岩体和新店岩体在 TAS 图解下均落在狭义的花岗岩区(图 9), 都表现出强过铝质的特性 (ASI = 1.11 ~ 1.19)。两个岩体均含有太古代的锆石残核, 其岩相学、主量元素、微量元素和同位素特征, 都表明它们属于强过铝的 S 型花岗岩, 在 Barbarin 的花岗岩类分类中可划分为含锆青石

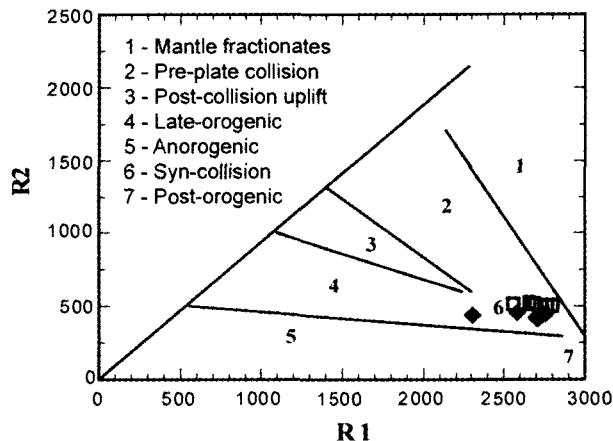


图11 中祁连早古生代花岗岩体 R1 - R2 因子判别图(据 Batchelor et al., 1985)。样品图例与图 6 同。

R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti); R2 = 6Ca + 2Mg + Al
Fig. 11 R1 - R2 diagram of Dongjiazhuang and Xindian Plutons (after Batchelor et al., 1985)
R1 = 4Si - 11(Na + K) - 2(Fe + Ti); R2 = 6Ca + 2Mg + Al

及富黑云母过铝花岗岩类 (CPGs), 应是沉积岩部分熔融产生 (Barbarin 1990; 1999)。这两个岩体的样品类似于海西强过铝花岗岩 (Sylvester, 1998), 具有相对较高的 w(CaO)/w(Na₂O) 比(0.35 ~ 0.60, > 0.3), 中等的 w(Al₂O₃)/w(TiO₂) 比值(0.41 ~ 115, 平均 67), 指示它们的源岩是贫粘土、富斜长石的砂屑岩。这与 A/FM - C/FM 图解 (Alther et al., 2000) 得到的结论一致 (图 10)。董家庄岩体和新店岩体在 R₁ - R₂ 图解中投影在同碰撞花岗岩范围内 (图 11)。

董家庄和新店同碰撞花岗岩发育有 2.6Ga、2.1 ~ 2.2Ga 继承锆石和 1.7Ga 的碎屑锆石, 并有 1.7Ga 和 2.1Ga 的 Nd 模式年龄, 这表明中祁连的块体属性与来源都比较复杂 (万渝生等, 2003; 董国安等, 2007)。中祁连以发育有元古代的高级变质岩与元古代的花岗质岩为特征 (冬天贵, 1997; 万渝生等, 2003; 郭进京, 1999a, 1999b, 1999c; 张宏飞等, 2006; 董国安等, 2007; 徐旺春等, 2007), 但同时也有蛇绿岩和古生代的花岗岩 (左国朝等, 1997, 1999; 邱家骧等, 1998), 还发育有早古生代的阿拉斯加型岩体 (张旗等, 1997; 周德进等, 1997; 刘传周等, 2005)。因此, 中祁连在早古生代很可能是一个日本型的岛弧地体。已有研究工作表明, 早古生代北祁连洋盆可能存在向南的俯冲作用 (张旗等, 1997; 周德进等, 1997; 左国朝等, 1997, 1999; 刘传周等, 2005)。

前已叙及,目前关于青藏高原北缘古生代大地构造演化还存在“由南往北为统一的俯冲-碰撞构造演化”(Yang *et al.*, 2002; 杨经绥等, 2003; Song *et al.*, 2006)与“多地体拼贴增生”(许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1995, 1996; 张建新等, 1995, 1997, 1998; Xu *et al.*, 2006)等不同认识。祁连-昆仑造山带北部以早古生代的大洋岩石圈板块俯冲为特征(吴汉泉等, 1990; 许志琴等, 1994; 夏林圻等, 1995, 1996; 张旗等, 1997; 宋述光, 1997; 左国朝等, 1997, 1999; 张建新等, 1995, 1997, 1998), 而南部的柴北缘是典型的早古生代大陆碰撞过程(杨建军等, 1994; 杨经绥等, 1998, 2000, 2001, 2003; 吴才来等, 2004; Song *et al.*, 2006)。而中祁连日本型的岛弧地体及其向南俯冲的这种格局将比较符合于青藏高原北缘的主体部分发育古生代的多重俯冲-碰撞造山作用的特征(许志琴等, 1994; Sobel and Arnaud, 1999; Yin and Harrison, 2000; Xiao *et al.*, 2002a; 2002b; 2003; 2005; Yuan *et al.*, 2003; 2005; Xu *et al.*, 2006; Song *et al.*, 2006)。青藏高原北缘造山带在晚古生代又受到南面特提斯造山作用的叠加和改造(Yin and Harrison, 2000)。这些事件均可在本文中祁连的古生代花岗岩中有所体现。因此,我们认为中祁连董家庄岩体和新店岩体记录了青藏高原北缘古生代的俯冲-碰撞多期次复杂造山作用,但精确的拼贴过程仍需进一步的工作。

致谢 LA-ICP MS 法锆石 U-Pb 年龄测定得到了西北大学地质系教育部大陆动力学重点实验室柳小明博士、第五春荣和林慈奎的指导与帮助; 主量、微量元素与同位素分析得到李禾、曹杰、靳新娣、李艳红、褚著银、李潮峰和郑爱力的指导与帮助。在此一并表示感谢。

References

- Alther R, Holl A, Hegner E *et al.* 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type Plutonism in the European Variscides: northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos*, 50: 51 - 73
- Barbarin B. 1990. Granitoids: main petrogenetic classifications in relation to origin and tectonic setting. *Geological Journal*, 25: 227 - 238
- Barbarin B. 1996. Genesis of the two main types of peraluminous granitoids. *Geology*, 24(4): 295 - 298
- Barbarin B. 1999. A review of relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments. *Lithos*, 46: 605 - 626
- Batchelor RA. 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology*, 48: 43 - 55
- Boynnton WV, Bowden P. 1984. Geochemistry of the rare earth elements; meteorite study. In: Henderson P (ed.). *Rare Earth Element Geochemistry*. Elsevier, 63 - 114
- Chappell BW and White AJR. 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology*, 8: 173 - 174
- Chappell BW and White AJR. 1992. I- and S-type granites in the Lachlan Fold belt. *Trans. Royal Soc. Edinburgh; Earth Sci.*, 83: 1 - 26
- Chappell BW and White AJR. 2001. Two contrasting granite types: 25 years later. *Australian Journal of Earth Sciences*, 48: 489 - 499
- Dong GA, Yang HR, Yang HY *et al.* 2007. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of Precambrian basement and their geology implications in Qilian Block. *Chinese Science Bulletin*, 52(13): 1572 - 1585 (in Chinese)
- Feng YM, He SP. 1995a. Research for ecology and geochemistry of several ophiolites in the North Qilian Mountains, China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(Suppl.): 125 - 146 (in Chinese with English abstract)
- Feng YM, He SP. 1995b. Basic characteristics of tectonics in the Qilian Mountains and its neighbourings—on genetic environments of early Paleozoic marine volcanics. *Northwest Geoscience*, 16(1): 92 - 103 (in Chinese with English abstract)
- Feng YM, He SP. 1996. *Tectonics and Orogeny of Qilian Mountain*. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- Guo JJ, Zhang GW, Lu SN *et al.* 1999a. A discussion on the Proterozoic stratigraphy framework in the basement of eastern section of the Mid-Qilian Massif. *Regional Geology of China*, 18(4): 376 - 399 (in Chinese with English abstract)
- Guo JJ, Zhang GW, Lu SN *et al.* 1999b. Analysis for sedimentary-tectonic setting of the Huangyuan Group in the eastern Mid-Qilian Massif, Qilian orogenic belt. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 29: 343 - 347 (in Chinese with English abstract)
- Guo JJ, Zhao FQ, Li HK. 1999c. Jinningian collisional granite belt in the eastern sector of the Central Qilian massif and its implication. *Acta Geoscientia Sinica*, 20(1): 10 - 15 (in Chinese with English abstract)
- Li XH, Li WX, Li ZX. 2007. On the genetic classification and tectonic implications of the Early Yanshanian granitoids in the Nanling range. *South China. Chinese Science Bulletin*, 52(14): 1837 - 1885
- Liou JG, Wang XM, Golemen RG. 1989. Blueschists in major suture zones of China. *Tectonics*, 8(3): 609 - 619
- Liu CZ, Xiao WJ, Yuan C *et al.* 2005. The petrological and geochemical characteristics of the Zhamashi mafic complex, Qilian Mountain and their tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 21(1): 57 - 64 (in Chinese with English abstract)
- Middlemost EAK. 1994. Naming materials in the magma/igneous rocks system. *Earth-Science Review*, 37: 215 - 224
- Geological Survey Team of the Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources. 1991. 1: 200 000 Scale Geological Map (Huang Yuan). Xining: Qinghai Bureau of Geology and Mineral Resources, 37 - 51 (in Chinese)
- Qiu JX, Lin JQ. 1991. *Chemical of Petrology*. Beijing: Geological Publishing House. (in Chinese)
- Qiu JX, Zeng GC, Zhu YH, Su SG. 1998. Characteristics and latitudinal comparative research on the early Palaeozoic volcanic rocks of rifted orogenic belt and small ocean basin ophiolite suit from northern Qinling Mountains and southern Qilian mountains. *Geological Journal of China Universities*, 4(4): 393 - 405 (in Chinese with English abstract)
- Sobel E, Arnaud N. 1999. A possible middle Paleozoic suture in the Altyn Tagh, NW China. *Tectonics*, 18: 64 - 74
- Song SG. 1997. Tectonic evolution of subductive complex belts in the North Qilian Mountains. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 352 - 365 (in Chinese with English abstract)
- Song SG, Zhang LF, Niu Y, Su L, Song B, Liu DY. 2006. Evolution from oceanic subduction to continental collision; a case study of the Northern Tibetan Plateau inferred from geochemical and geochronological data. *Journal of Petrology*, 47: 435 - 455
- Su JP, Hu NG, Zhang HF *et al.* 2004a. U-Pb Zircon dating and genesis of the Heigouliangzi granitic intrusion in the western segment of the middle Qilian Mountains. *Geoscience*, 18(1): 70 - 74 (in Chinese with English abstract)
- Su JP, Zhang XH, Hu NG *et al.* 2004b. Geochemical characteristics and genesis of adakite-like granites at Yema Nanshan in the western segment of the Central Qilian Mountains. *Geology in China*, 31(4): 365 - 371 (in Chinese with English abstract)
- Sun SS and McDonough WF. 1989. Chemical and isotope systematics of

- oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. Geological Society Special Publication, 22: 313–345
- Sylvester PJ. 1998. Post-collisional strongly peraluminous granites. *Lithos*, 45: 29–44
- Tong TG. 1997. An approach to the greenstone belt in eastern Middle Qilian. *Geology of Qinghan*, 1: 7–20 (in Chinese)
- Wan YS, Xu ZQ, Yang JS *et al.* 2003. The Precambrian high-grade basement of the Qilian Terrane and neighboring areas: its ages and compositions. *Acta Geoscientia Sinica*, 24 (4): 319–324 (in Chinese with English abstract)
- Wang Q, Liu XY. 1976. Paleo-oceanic crust of the Chilianshan region, western China and its tectonic significance. *Scientia Geologica Sinica*, (1): 42–55 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Yang JS, Xu ZQ *et al.* 2004a. Granitic magmatism on the early Paleozoic UHP belt of Northern Qaidam, NW China. *Acta Geologica Sinica*, 78(5): 658–674 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Yang JS, Yang HY *et al.* 2004b. Dating of two types of granite from north Qilian, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 425–432 (in Chinese with English abstract)
- Wu CL, Yao SZ, Yang JS *et al.* 2006. Double subduction of the Early Paleozoic North Qilian oceanic plate: Evidence from granites in the central segment of North Qilian, NW China. *Geology in China*, 33(6): 1198–1208 (in Chinese with English abstract)
- Wu HQ, Feng YM, Huo YG *et al.* 1990. The discovery of Ordovician lawsonite-Glaucophane schist in the middle section of the Northern Qilian Mountains, Sunan county, Gansu province and its significance. *Geological Review*, 36(3): 277–280 (in Chinese with English abstract)
- Wu HQ, Feng YM. 1993. Metamorphism and deformation of blueschist belts and their tectonic implication, North Qilian Mountains, China. *Journal of Metamorphic Geology*, 11: 523–536
- Wu YB and Zheng YF. 2004. Genesis of Zircon and its constraints on interpretation of U-Pb age. *Chinese Science Bulletin*, 49(16): 1589–1604
- Xia LQ, Xia CZ, Xue XY. 1996. Petrogenesis of the Marine Volcanic Rocks from North Qilian. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY. 1995. Dynamics of tectono-volcano-magmatic evolution from North Qilian Mountains, China. *Northwest Geoscience*, 16(1): 1–28 (in Chinese with English abstract)
- Xia LQ, Xia ZC, Xu XY. 2003. Magmatogenesis in the Ordovician backarc basins of the Northern Qilian Mountains, China. *Geological Society of America Bulletin*, 115(12): 1510–1522
- Xiao WJ, Windley BF, Hao J, Li, JL. 2002a. Arc-ophiolite obduction in the Western Kunlun Range (China): implications for the Palaeozoic evolution of central Asia. *Journal of the Geological Society, London*. 159: 517–528
- Xiao WJ, Windley BF, Chen HL, Zhang GC, Li JL. 2002b. Carboniferous-Triassic subduction and accretion in the western Kunlun, China: Implications for the collisional and accretionary tectonics of the northern Tibetan plateau. *Geology*, 30: 295–298
- Xiao WJ, Han FL, Windley BF, Yuan C, Zhou H, Li JL. 2003. Multiple accretionary orogenies and episodic growth of continents: Insights from the Western Kunlun Range, central Asia. *International Geology Review*, 45: 303–328
- Xiao WJ, Windley BF, Liu DY, Jian P, Liu CZ, Yuan C, Sun M. 2005. Accretionary Tectonics of the Western Kunlun orogen, China: A Paleozoic - Early Mesozoic, long-lived active continental margin with implications for the growth of southern Eurasia. *Journal of Geology*, 113: 687–705
- Xiao XC, Chen GM, Zhu ZZ. 1978. A preliminary study on the tectonics of ancient ophiolites in the Qilian Mountain, Northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 54(4): 287–295 (in Chinese with English abstract)
- Xu WC, Zhang HF, Liu XM. 2007. Zircon U-Pb dating of high pressure metamorphic rocks: constraints on age and tectonics implications. *Chinese Science Bulletin*, 52(10): 1174–1182 (in Chinese)
- Xu ZQ, Xu HF, Zhang JX *et al.* 1994. The Zhoulang Nanshan Caledonian subduction complex in the Northern Qilian Mountains and its dynamics. *Acta Geologica Sinica*, 68(1): 1–14 (in Chinese with English abstract)
- Xu ZQ, Yang JS, Wu CL, Li HB, Zhang JX, Qi XX, Song SG, Qiu HJ. 2006. Timing and mechanism of formation and exhumation of the Northern Qaidam ultrahigh-pressure metamorphic belt. *Journal of Asian Earth Sciences*, 28: 160–173
- Yang JS, Xu ZQ, Zhang JX, Song SC, Shi RD, Wu CL, Li HB, Brunel M. 2002. Early Paleozoic North Qaidam UHP metamorphic belt on the north-eastern Tibetan plateau and a paired subduction model. *Terra Nova*, 14: 397–404
- Yin A, Harrison T M. 2000. Geological evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211–280
- Yong Y, Xiao WJ, Yuan C *et al.* 2008. The Geochronology and Geochemistry of granitic plutons from the eastern Central Qilian and their tectonic implications. *Xinjiang Geology*, 26(1): 210–219 (in Chinese with English abstract)
- Yuan C, Sun M, Zhou MF, Xiao WJ, Zhou H. 2005. Geochemistry and petrogenesis of the Yishak volcanic sequence, Kudi ophiolite, West Kunlun (NW China): Implications for the magmatic evolution in a subduction zone environment. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 150: 195–211
- Yuan C, Sun M, Zhou M - F, Zhou H, Xiao WJ, Li JL. 2003. Absence of the Archean basement for the South Kunlun Block: Nd-Sr-O isotopic evidence from granitoids. *Island Arc*, 12: 13–21
- Zhang HF, Jin LL, Zhang L *et al.* 2006. Pb and Nd isotopic compositions of basement and granitoid in the Qilianshan: constraints on tectonic affinity. *Earth Science*, 31(1): 57–65 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Xu ZQ, Chen W *et al.* 1997. A tentative discussion on the ages of the subduction-accretionary complex/volcanic arcs in the middle sector of North Qilian Mountain. *Acta Petrologica Mineralogica*, 16(2): 112–119 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Xu ZQ, Xu HF *et al.* 1998. Framework of North Qilian Caledonian Subduction-accretionary wedge and its deformation dynamics. *Scientia Geologica Sinica*, 33(3): 290–299 (in Chinese with English abstract)
- Zhang JX, Xu ZQ. 1995. Caledonian subduction-accretionary complex/volcanic arc zone and its deformation features in the middle section of North Qilian Mountains. *Acta Geoscientia Sinica*, (2): 154–163 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Q, Sun XM, Zhou DJ *et al.* 1997. The characteristics of North Qilian ophiolites, forming settings and their tectonic significance. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 366–393 (in Chinese with English abstract)
- Zhou DJ, Chen YT, Zhang Q *et al.* 1997. The founding of Alaska-type mafic-ultramafic complex from Qilian county and constraints on Qilian Mt. tectonic evolution. *Scientia Geologica Sinica*, 32(1): 122–127 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC, Wu HQ. 1997. A bi-subduction-collision orogenic model of early-Paleozoic in the middle part of North Qilian areas. *Advance in Earth Sciences*, 12(4): 315–323 (in Chinese with English abstract)
- Zuo GC, Wu MB, Mao JW *et al.* 1999. Structural evolution of early Paleozoic tectonic belt in the west section of Northern Qilian area. *Acta Geologica Gansu*, 8(1): 6–13 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 董国安, 杨怀仁, 杨宏仪等. 2007. 祁连地块前寒武基底锆石 SHRIMP U-Pb 年代学及其地质意义. *科学通报*, 52(13): 1572–1585
- 冯益民, 何世平. 1995a. 北祁连蛇绿岩的地质地球化学研究. *岩石*

- 学报, 11(增刊): 125 - 146
- 冯益民, 何世平. 1995b. 祁连山及其邻区大地构造基本特征——兼论早古生代海相火山岩的成因环境. 西北地质科学, 16(1): 92 - 103
- 冯益民, 何世平. 1996. 祁连山大地构造与造山作用. 北京: 地质出版社
- 郭进京, 张国伟, 陆松年等. 1999a. 中祁连地块东段元古宙基底地层格架讨论. 中国区域地质, 18(4): 376 - 399
- 郭进京, 张国伟, 陆松年等. 1999b. 中祁连地块东段元古宙基底湟源群沉积构造环境. 西北大学学报(自然科学版), 29: 343 - 347
- 郭进京, 赵凤清, 李怀坤. 1999c. 中祁连东段晋宁期碰撞型花岗岩及其地质意义. 地球学报, 20: 10 - 15
- 李献华, 李武显, 李正祥. 2007. 再论南岭燕山早期花岗岩的成因类型与构造意义. 科学通报, 52(9): 981 - 990
- 刘传周, 肖文交, 袁超等. 2005. 祁连山扎麻什基性杂岩体岩石地球化学特征及其大地构造意义. 岩石学报, 21(1): 57 - 64
- 青海省地质局区域地质测量队. 1965. 1: 20 万湟源幅地质图说明书. 西宁: 地质部青海省地质局, 37 - 51
- 邱家骧, 林景任. 1991. 岩石化学. 北京: 地质出版社, 203 - 210
- 邱家骧, 曾广策, 朱云海, 苏尚国. 1998. 北秦岭—南祁连早古生代裂谷造山带: 火山岩与小洋盆蛇绿岩套特征及纬向对比. 高校地质学报, 4(4): 393 - 405
- 宋述光. 1997. 北祁连山俯冲杂岩带的构造演化. 地球科学进展, 12(4): 352 - 365
- 苏建平, 胡能高, 张海峰等. 2004a. 中祁连西段黑沟梁子花岗岩的锆石 U-Pb 同位素年龄及成因. 现代地质, 18(1): 70 - 74
- 苏建平, 张新虎, 胡能高等. 2004b. 中祁连西段野马南山埃达克质花岗岩的地球化学特征及成因. 中国地质, 31(4): 365 - 371
- 佟天贵. 1997. 中祁连东段绿岩带刍议. 青海地质, 1: 7 - 20
- 万渝生, 许志琴, 杨经绥, 张建新. 2003. 祁连造山带及邻区前寒武纪变质基底的时代和组成. 地球学报, 24(4): 319 - 324
- 王荃, 刘雪亚. 1976. 我国西部祁连山区的古海洋地壳及其大地构造意义. 地质科学, (1): 42 - 55
- 吴才来, 杨经绥, 许志琴等. 2004. 柴达木盆地北缘古生代超高压带中花岗质岩浆作用. 地质学报, 78(5): 658 - 674
- 吴才来, 杨经绥, 杨宏仪等. 2004. 北祁连东部两类 I 型花岗岩定年及其地质意义. 岩石学报, 20(3): 425 - 432
- 吴才来, 姚尚志, 杨经绥等. 2006. 北祁连洋早古生代双向俯冲的花岗岩证据. 中国地质, 33(6): 1198 - 1208
- 吴汉泉, 冯益民, 霍有光等. 1990. 北祁连山中段甘肃南奥陶系变质硬柱石蓝闪片岩的发现及其意义. 地质评论, 36(3): 277 - 280
- 吴元保, 郑永飞. 2003. 锆石成因矿物学研究及其对 U-Pb 年龄解释的制约. 科学通报, 49(16): 1589 - 1604
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1995. 北祁连山构造-火山岩浆演化动力学. 西北地质科学, 1(1): 1 - 28
- 夏林圻, 夏祖春, 徐学义. 1996. 北祁连海相火山岩岩石成因. 北京: 地质出版社
- 肖序常, 陈国铭, 朱志直. 1978. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义. 地质学报, 54(4): 287 - 295
- 徐旺春, 张宏飞, 柳小明. 2007. 锆石 U-Pb 定年限制祁连山高级变质岩系的形成时代及其构造意义. 科学通报, 52(10): 1174 - 1180
- 许志琴, 徐惠芬, 张建新等. 1994. 北祁连走廊南山加里东俯冲杂岩增生地体及其动力学. 地质学报, 68(1): 1 - 14
- 杨建军, 朱红, 邓晋福等. 1994. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义. 岩石矿物学杂志, 13(2): 97 - 104
- 杨经绥, 宋述光, 许志琴等. 2001. 柴北缘早古生代高压-超高压变质带中发现典型超高压矿物—柯石英. 地质学报, 75(2): 175 - 179
- 杨经绥, 许志琴, 李海兵等. 1998. 我国西部柴北缘地区发现榴辉岩. 科学通报, 43: 1544 - 1548
- 杨经绥, 许志琴, 宋述光等. 2000. 青海都兰榴辉岩的发现: 试论我国中央造山带中的高压-超高压变质带的分布及其构造意义. 地质学报, 74(2): 156 - 168
- 杨经绥, 张建新, 孟繁聪等. 2003. 中国西部柴北缘—阿尔金的超高压变质榴辉岩及其原岩性质探讨. 地学前缘, 10(3): 291 - 313
- 雍拥, 肖文交, 袁超等. 2008. 中祁连东段花岗岩 LA-ICPMS 锆石 U-Pb 年龄及地质意义. 新疆地质, 26(1): 210 - 219
- 袁洪林, 吴福元, 高山等. 2003. 东北地区新生代侵入体的锆石激光探针 U-Pb 年龄测定与稀土元素成分分析. 科学通报, 48(14): 1511 - 1520
- 张宏飞, 靳兰兰, 张利等. 2006. 基底岩系和花岗岩类 Pb-Nd 同位素组成限制祁连山带的构造属性. 地球科学, 31(1): 57 - 65
- 张建新, 许志琴, 陈文等. 1997. 北祁连中段俯冲-增生杂岩、火山弧的时代探讨. 岩石矿物学杂志, 16(2): 112 - 119
- 张建新, 许志琴, 徐惠芬等. 1998. 北祁连加里东期俯冲-增生楔结构及动力学. 地质科学, 33(3): 290 - 299
- 张建新, 许志琴. 1995. 北祁连中段加里东俯冲-增生杂岩、火山弧带及其变形特征. 地球学报, (2): 154 - 163
- 张旗, 孙晓猛, 周德进等. 1997. 北祁连蛇绿岩的特征、形成环境及其构造意义. 地球科学进展, 12(4): 366 - 393
- 周德进, 陈雨, 张旗等. 1997. 北祁连山南侧阿拉斯加型岩体的发现及地质意义. 地质科学, 32(1): 122 - 127
- 左国朝, 吴汉泉. 1997. 北祁连中段早古生代双向俯冲-碰撞造山模式剖析. 地球科学进展, 12(4): 315 - 323
- 左国朝, 吴茂炳, 毛景文等. 1999. 北祁连西段早古生代构造演化史. 甘肃地质学报, 8(1): 6 - 13