

东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄及构造意义*

陆露¹ 吴珍汉² 胡道功¹ Patrick J BAROSH³ 郝爽⁴ 周春景¹

LU Lu¹, WU ZhenHan², HU DaoGong¹, Patrick J BAROSH³, HAO Shuang⁴ and ZHOU ChunJing¹

1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100037

2. 中国地质科学院, 北京 100081

3. P. J. Barosh and Associates, 103 Aaron Avenue, Bristol, RI 02809, USA

4. 天津地质矿产研究所, 天津 300170

1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

2. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081, China

3. P. J. Barosh and Associates, 103 Aaron Avenue, Bristol, RI 02809, USA

4. Tianjin Institute of Geology and Mineral Resources, Tianjin 300170, China

2009-11-27 收稿, 2009-12-27 改回.

Lu L, Wu ZH, Hu DG, Barosh PJ, Hao S and Zhou CJ. 2010. Zircon U-Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains. *Acta Petrologica Sinica*, 26(4):1150–1158

Abstract The Maoniushan Formation of molasse, formed in a post-orogenic volcano-sedimentary basin at the Shuimichang area in the East Kunlun Mountains, rest unconformably on pre-Devonian strata and its forming time is important for determining the closure of the Early Paleozoic Ocean in this region. We made zircon U-Pb dating for rhyolite interlayers from different levels of this formation by LA-MC-ICPMS. The rhyolite (sample B743-2) above the basal conglomerate of the Maoniushan Formation on the northern margin of the basin yielded an average zircon U-Pb age of 423.2 ± 1.8 Ma and the rhyolite (sample B820-1) above the basal conglomerate of the formation on the west margin of the basin yielded an average zircon U-Pb age of 408.2 ± 2.4 Ma. The rhyolite interlayers (samples B705-1 and B656-1) from detrital rocks of the middle-upper formation yielded two average zircon U-Pb ages: 404.9 ± 4.8 Ma and 399.6 ± 2.8 Ma. These ages should represent the forming times for different levels of the Maoniushan Formation and thus provide a constrain to the forming time of the formation in this area, that is, 400 ~ 423 Ma. Therefore, it is suggested that the closure time of the Early Paleozoic Ocean should be in the Late Silurian. The discovery of 2468 ~ 920 Ma zircon of the Proterozoic age in the rhyolite shows that the metamorphic basement south of the East Kunlun Mountains would be similar to that of the Yangtze plate and would develop during the formation of the Rodinia supercontinent 900 ~ 1000 Ma ago.

Key words Maoniushan Formation; Rhyolite; Zircon U-Pb age; Late Silurian-Early Devonian; East Kunlun orogenic belt

摘要 东昆仑水泥厂地区造山后火山-沉积盆地内形成的牦牛山组磨拉石建造不整合覆盖在前泥盆系地层之上,其形成时代的研究对限定东昆仑早古生代洋盆关闭的时间具有重要意义。应用激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)方法,对火山-沉积盆地内牦牛山组不同层位的流纹岩夹层进行了精确的锆石 U-Pb 定年研究。结果表明,盆地北缘牦牛山组底砾岩之上的流纹岩(B743-2)中岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄平均值为 423.2 ± 1.8 Ma,盆地西缘牦牛山组底砾岩之上的流纹岩(B820-1)中岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄平均值为 408.2 ± 2.4 Ma,盆地西缘和南缘牦牛山组中上部碎屑岩中流纹岩夹层(B705-1和B656-1)的岩浆锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 年龄平均值分别为 404.9 ± 4.8 Ma和 399.6 ± 2.8 Ma。它们代表了牦牛山组不同层位火山岩的形成年龄,由此可以限定水泥厂地区牦牛山组形成时间为 400 ~ 423 Ma。上述年代学结果较为精确地限定了东昆仑早古生代洋盆关闭的构造年代。流纹岩中 2468 ~ 920 Ma 元古代继承锆石的发现,说明东昆仑南的变质基底和扬子板块变

* 本文受中国地质调查局国土资源大调查项目(1212010711510)和科技部国际合作重点项(2006DFB211330)联合资助。

第一作者简介: 陆露,女,1985年生,硕士研究生,构造地质专业,E-mail: yangchunyoulu@163.com

质基底类似,是晋宁期 0.9~1.0Ga 罗迪尼亚超大陆形成时发育起来的。

关键词 牦牛山组;流纹岩;锆石 U-Pb 年龄;晚志留世-早泥盆世;东昆仑造山带

中图法分类号 P588.141;P597.3

东昆仑造山带经历了漫长的地质演化过程和多次造山运动,形成了典型的复合造山带。最新研究表明,昆仑山具有多期造山作用叠合的大地构造特征(郝杰等,2003),东昆仑造山带则是由加里东和印支期叠置变形组成的复合造山带(许志琴等,2007),并认为牦牛山组磨拉石建造标志着早古生代造山运动的结束(Pan *et al.*, 1996;许志琴等,2007;李荣社等,2007;张雪亭和杨生德,2007)。虽然古生物证据表明牦牛山组形成于晚泥盆世,但由于受地质条件的限制,以往化石主要来自牦牛山组上部层位,而对其下部层位出露的大套火山岩目前还缺乏精确的同位素年代学研究,制约了对东昆仑造山带大地构造的深入研究。本文在三年野外详细地质填图的基础上,选择格尔木水泥厂地区分布面积较大而且地层接触关系清楚的牦牛山组磨拉石中流纹岩夹层进行 LA-MC-ICPMS 锆石 U-Pb 测年研究,以约束牦牛山组形成时代,为东昆仑早古生代构造演化研究提供年代学证据。

1 区域地质背景与采样点地质特征

研究区位于东昆仑造山带东段的东昆仑南地体,其南北两侧的东昆仑北地体和巴颜喀拉地体分别由昆中断裂和昆南-阿尼玛卿断裂与之相隔(许志琴等,2007)。东昆仑北地体以出露古老变质岩为特征,主要由高角闪岩相-麻粒岩相变质的古-中元古界金水口群和中-新元古界冰沟群浅变质的碎屑岩和碳酸盐岩所组成,经历了早古生代变质作用,上部被牦牛山组磨拉石建造不整合覆盖。早古生代及三叠纪花岗岩侵入其中。巴颜喀拉地体主要由三叠系巴颜喀拉山群和少量新生代地层所组成。东昆仑南地体下部由中-新元古界万保沟群和奥陶-志留系纳赤台群浅变质碎屑岩、火山岩和碳酸盐岩组成,牦牛山组磨拉石建造和下三叠统洪水川组碎屑岩不整合在前泥盆系地层之上。

牦牛山组广泛分布于早古生代造山后磨拉石盆地,如东昆仑北缘逆冲断裂带南、北两侧的肯德可克、锯齿山、水泥厂东、宗加南和那更滩等盆地,但对其形成时代存在分歧。在 1:20 万格尔木市幅地质图中,根据区域岩性对比和柴达木盆地东缘夏日哈及北缘阿木尼克等地发现的植物化石,将其时代定为晚泥盆世,而水泥厂东火山-沉积盆地内地层时代被认为是早二叠世(青海省地质矿产局,1981^①)或中晚泥盆世(青海省地质调查院,2004^②),部分地层划为中二叠统闹仓坚沟组和下三叠统洪水川组,但均缺乏年龄和化石依据。2007~2009 年野外详细地质填图结果表明,水泥厂地区牦牛山组主要由砾岩和细碎屑岩及多层流纹岩夹层组成,为研究地层形成时代和构造演化提供了理想的测年对象。

我们在格尔木水泥厂东侧由牦牛山组组成的火山-沉积

盆地中选择了四个地层接触关系清楚的地点进行了 U-Pb 测年样品的采集(图 1),四个测年样品均为流纹岩。样品 B743-2 取自大干沟南侧牦牛山组底部紫红色大理岩质砾岩之上的灰白色流纹岩,流纹岩层厚 85m,产状 $190^{\circ} \angle 65^{\circ}$,其北侧与纳赤台群结晶灰岩断层接触;B820-1 取自水泥厂东灰白色大理岩质砾岩之上的灰白色流纹岩层的下部(图 2a),流纹岩层厚 225m,产状 $170^{\circ} \angle 40^{\circ}$,20m 厚的底砾岩不整合覆盖在纳赤台群哈拉巴依沟组灰绿色斑点砂岩之上(图 2b),下伏纳赤台群向南陡倾,产状 $160^{\circ} \angle 85^{\circ}$;B705-1 取自水泥厂北东灰、灰褐色砂岩与砾岩中的流纹岩夹层,流纹岩厚 15m,产状 $180^{\circ} \angle 73^{\circ}$,与南侧的纳赤台群流纹岩及北侧的万保沟群白色大理岩断层接触;样品 B656-1 取自大干沟南侧牦牛山组上部层位灰紫色砾岩和砂岩中的流纹岩夹层,流纹岩厚约 50m,岩层南倾,倾角 $35^{\circ} \angle 50^{\circ}$,其南侧与中三叠统闹仓坚沟组断层接触(图 1)。

2 测试方法

锆石按常规方法分选,最后在双目镜下挑纯。将分选锆石用双面胶粘在载玻片上,罩上 PVC 环,然后将环氧树脂和固化剂进行充分混合后注入 PVC 环中,待树脂充分固化后将样品从靶从载玻片上剥离,并对其进行打磨和刨光,然后对靶上样品进行显微镜下的反射光和透射光照相以及阴极发光(CL)照相。

锆石 Pb、U 和 Th 同位素分析在天津地质矿产研究所同位素实验室新近安装的激光烧蚀多接收器电感耦合等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)系统上完成。其多接收器电感耦合等离子体质谱仪为 Thermo Fisher 公司制造的 Neptune,离子光学通路采用能量聚焦和质量聚焦的双聚焦设计,并采用动态变焦(ZOOM)使质量色散达到 17%。仪器配有 9 个法拉第杯接受器和 4 个离子计数器接受器。激光器为美国 ESI 公司生产的 UP193-FX ArF 准分子激光器,激光波长 193nm,脉冲宽度 5ns,束斑直径为 2~150 μ m 可调,脉冲频率 1~200Hz 连续可调。本次测试根据锆石 CL 图像和透射光及反射光照片,利用 193nm 激光器对锆石进行剥蚀,设置的剥蚀坑直径为 35 μ m,激光能量密度为 13~14J/cm²,频率为 8~10Hz,激光剥蚀物质以 He 为载气送入 Neptune,利用动态变焦扩大色散同时接受质量数相差很大的 U-Pb 同位

① 青海省地质矿产局. 1981. 中华人民共和国区域地质调查报告-格尔木市幅、纳赤台幅(1:20 万)

② 青海省地质调查院. 2004. 中华人民共和国区域地质调查报告-水泥厂幅、忠阳山幅、黑刺沟幅(1:5 万)

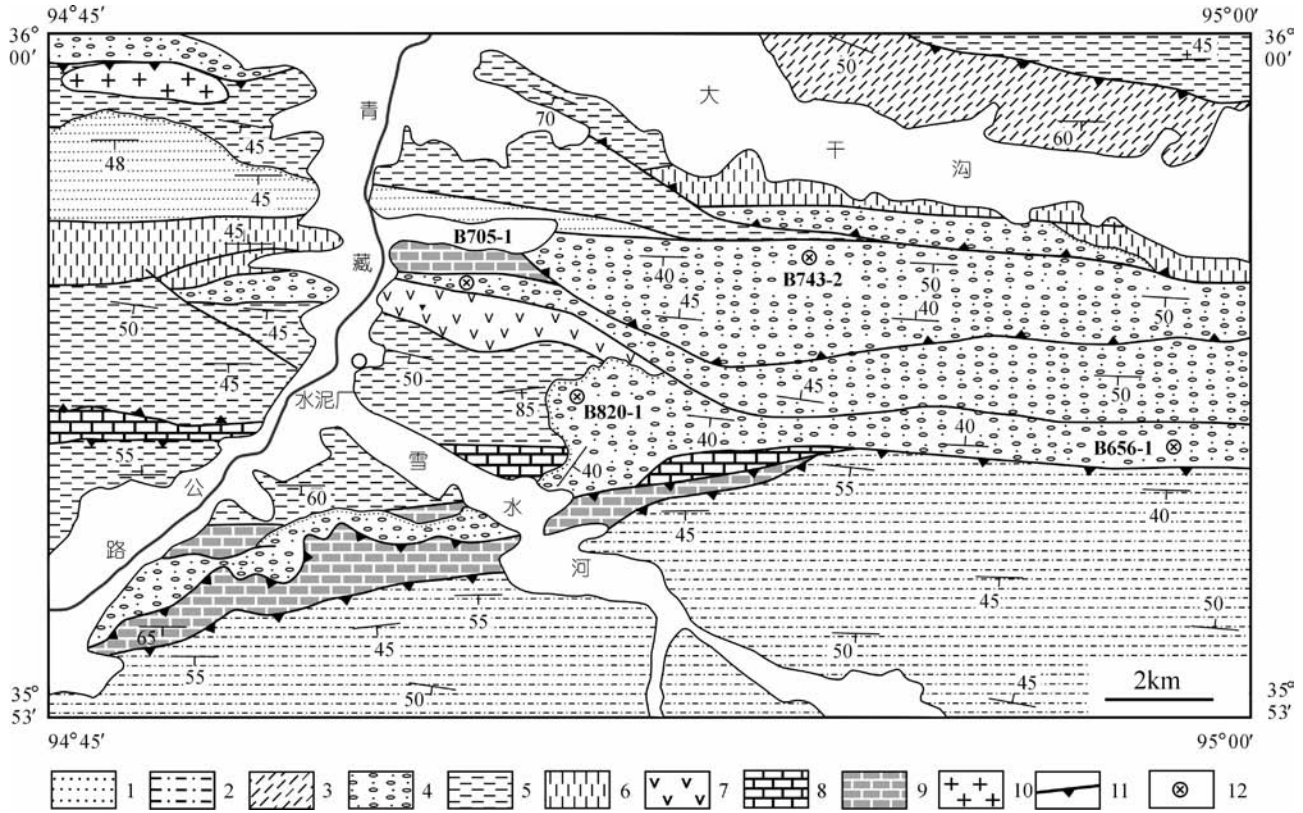


图1 格尔木南地质构造简图及采样点位置

1-下三叠统洪水川组;2-中三叠统闹仓堡组;3-上石炭统浩洛洛组;4-志留-泥盆系牦牛山组;5-奥陶-志留系纳赤台群哈拉巴依沟组;6-奥陶-志留系纳赤台群石灰厂组碳酸盐岩段;7-奥陶-志留系纳赤台群石灰厂组火山岩段;8-奥陶-志留系纳赤台群水泥厂组;9-中新元古界万保沟群碳酸盐岩组;10-志留纪花岗岩闪长斑岩;11-逆断层;12-采样点位置

Fig. 1 Geological map of south of the Golmud and location of samples

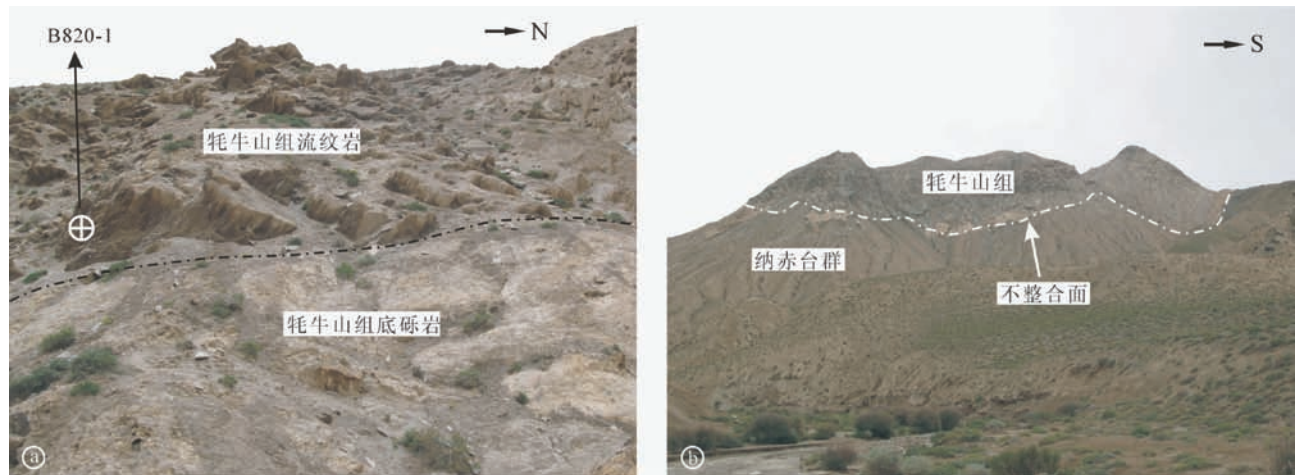


图2 水泥厂东牦牛山组产状及取样点位置

Fig. 2 Occurrences of Maoniushan Formation and location of sampling

素,从而进行锆石 U-Pb 同位素原位测定。采用 TEMORA 作为外部锆石年龄标样,利用 NIST612 玻璃标样作为外标计算锆石样品的 Pb、U、Th 含量。采用中国地质大学研发的 ICPMSDataCal 程序和 Ludwig 的 Isoplot 程序进行数据处

理,采用²⁰⁸Pb 校正法对普通铅进行校正。详细的实验流程见李怀坤等(2009)。实验分析结果见表1,测试数据的误差均为 1σ。

表 1 流纹岩锆石 LA-MC-ICPMS U-Pb 同位素年龄测定结果

Table 1 LA-MC-ICPMS U-Pb data for zircons from rhyolite rocks in Maoniushan Formation

测点	Pb ($\times 10^{-6}$)	U	Th/U	同位素原子比率						表面年龄 (Ma)			
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	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	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1 σ
B743-2													
1. 1	18	275	0. 23	0. 0684	0. 0006	0. 5333	0. 0074	0. 0565	0. 0007	427	4	474	29
2. 1	28	394	0. 34	0. 0685	0. 0006	0. 5359	0. 0102	0. 0568	0. 0008	427	4	483	32
3. 1	49	737	0. 25	0. 0683	0. 0005	0. 5162	0. 0064	0. 0548	0. 0007	426	3	406	27
4. 1	61	915	0. 27	0. 0672	0. 0005	0. 5214	0. 0072	0. 0563	0. 0008	419	3	463	30
5. 1	31	476	0. 26	0. 0669	0. 0005	0. 5206	0. 0066	0. 0564	0. 0007	417	3	470	27
6. 1	24	364	0. 25	0. 0682	0. 0005	0. 5178	0. 0069	0. 0551	0. 0007	425	3	416	28
8. 1	10	151	0. 28	0. 0676	0. 0005	0. 5271	0. 0089	0. 0566	0. 0009	422	3	475	37
9. 1	18	256	0. 52	0. 0676	0. 0005	0. 5316	0. 0074	0. 0571	0. 0008	422	3	494	30
10. 1	26	379	0. 25	0. 0686	0. 0005	0. 5179	0. 0104	0. 0547	0. 0009	428	3	402	39
11. 1	13	197	0. 35	0. 0672	0. 0005	0. 5218	0. 0082	0. 0563	0. 0008	419	3	465	33
12. 1	19	287	0. 26	0. 0682	0. 0005	0. 5188	0. 0070	0. 0552	0. 0007	425	3	420	29
13. 1	32	494	0. 27	0. 0662	0. 0005	0. 5293	0. 0066	0. 0580	0. 0007	413	3	530	27
16. 1	12	174	0. 29	0. 0683	0. 0006	0. 5205	0. 0059	0. 0553	0. 0008	426	3	423	33
17. 1	9	134	0. 27	0. 0678	0. 0005	0. 5217	0. 0126	0. 0558	0. 0012	423	3	444	49
19. 1	17	250	0. 38	0. 0678	0. 0006	0. 5191	0. 0045	0. 0555	0. 0007	423	3	434	29
20. 1	16	257	0. 41	0. 0624	0. 0006	0. 4781	0. 0042	0. 0556	0. 0008	390	3	435	31
B820-1													
1. 1	163	278	0. 26	0. 4374	0. 0055	8. 4423	0. 1052	0. 1400	0. 0016	2339	29	2227	19
2. 1	33	158	0. 97	0. 1519	0. 0016	1. 4605	0. 0202	0. 0697	0. 0008	912	10	920	23
3. 1	53	257	0. 06	0. 2178	0. 0024	2. 6166	0. 0337	0. 0871	0. 0009	1270	14	1364	21
4. 1	87	1302	0. 17	0. 0663	0. 0007	0. 4985	0. 0054	0. 0546	0. 0005	414	4	394	21
5. 1	108	1603	0. 38	0. 0648	0. 0007	0. 4929	0. 0055	0. 0552	0. 0005	405	4	420	21
6. 1	454	909	0. 34	0. 4452	0. 0047	9. 9858	0. 1068	0. 1627	0. 0015	2374	25	2484	16
7. 1	69	1074	0. 19	0. 0650	0. 0007	0. 5001	0. 0062	0. 0558	0. 0006	406	4	445	23
8. 1	138	973	0. 68	0. 1490	0. 0015	1. 4469	0. 0153	0. 0704	0. 0006	895	9	941	19
9. 1	70	288	0. 72	0. 1959	0. 0024	2. 3073	0. 0298	0. 0854	0. 0010	1153	14	1325	22
10. 1	105	1631	0. 19	0. 0658	0. 0007	0. 4947	0. 0055	0. 0545	0. 0005	411	4	391	22
11. 1	118	1782	0. 27	0. 0664	0. 0006	0. 4875	0. 0075	0. 0532	0. 0007	415	4	338	28
12. 1	69	1078	0. 23	0. 0654	0. 0007	0. 5011	0. 0065	0. 0556	0. 0006	408	4	437	24
13. 1	6	80	0. 57	0. 0653	0. 0007	0. 4956	0. 0100	0. 0550	0. 0009	408	4	413	36
14. 1	130	309	0. 26	0. 3805	0. 0041	8. 5471	0. 1067	0. 1629	0. 0017	2079	22	2486	18
15. 1	90	1477	0. 15	0. 0650	0. 0007	0. 5036	0. 0052	0. 0562	0. 0005	406	5	460	22
16. 1	256	4340	0. 14	0. 0650	0. 0006	0. 4893	0. 0050	0. 0546	0. 0005	406	4	396	20
17. 1	139	2354	0. 19	0. 0653	0. 0006	0. 4984	0. 0057	0. 0554	0. 0005	408	4	427	21
18. 1	104	1617	0. 14	0. 0658	0. 0008	0. 4898	0. 0086	0. 0540	0. 0008	411	5	370	32
19. 1	144	2324	0. 49	0. 0646	0. 0006	0. 4934	0. 0083	0. 0554	0. 0007	403	4	429	30
B705-1													
1. 1	59	961	0. 13	0. 0650	0. 0004	0. 4936	0. 0029	0. 0551	0. 0003	406	3	416	27
2. 1	82	1333	0. 12	0. 0643	0. 0004	0. 5021	0. 0067	0. 0567	0. 0006	402	3	478	33
3. 1	140	2610	0. 13	0. 0563	0. 0005	0. 4613	0. 0038	0. 0594	0. 0003	353	4	581	26
4. 1	60	904	0. 37	0. 0650	0. 0003	0. 5017	0. 0034	0. 0560	0. 0004	406	3	452	27
5. 1	168	2652	0. 15	0. 0663	0. 0003	0. 5031	0. 0026	0. 0550	0. 0003	414	3	413	26
6. 1	123	2014	0. 13	0. 0641	0. 0003	0. 4967	0. 0026	0. 0562	0. 0003	400	3	462	26
7. 1	69	1071	0. 14	0. 0662	0. 0004	0. 5046	0. 0067	0. 0552	0. 0007	414	3	422	34
8. 1	122	455	0. 47	0. 2533	0. 0013	3. 4235	0. 0181	0. 0980	0. 0005	1455	11	1587	22
9. 1	34	207	0. 32	0. 1603	0. 0008	1. 5790	0. 0096	0. 0714	0. 0004	959	7	969	25
10. 1	153	2474	0. 23	0. 0629	0. 0003	0. 5178	0. 0029	0. 0597	0. 0003	393	3	592	26
11. 1	187	655	0. 40	0. 2706	0. 0014	4. 0155	0. 0213	0. 1076	0. 0006	1544	12	1760	21
12. 1	32	123	0. 56	0. 2395	0. 0013	3. 0412	0. 0181	0. 0921	0. 0005	1384	11	1470	23
13. 1	8	115	0. 36	0. 0653	0. 0003	0. 5319	0. 0075	0. 0591	0. 0008	408	3	569	38
14. 1	28	457	0. 18	0. 0637	0. 0003	0. 4919	0. 0032	0. 0560	0. 0004	398	3	452	27

续表 1

Continued Table 1

测点	Pb ($\times 10^{-6}$)	U	Th/U	同位素原子比率						表面年龄 (Ma)			
				$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ	$^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$	1σ	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	1σ
15.1	18	280	0.43	0.0625	0.0003	0.4912	0.0051	0.0570	0.0006	391	3	491	33
16.1	147	2275	0.17	0.0673	0.0004	0.5176	0.0028	0.0558	0.0003	420	3	442	26
17.1	71	1099	0.29	0.0653	0.0004	0.5037	0.0028	0.0559	0.0003	408	3	449	26
18.1	29	153	1.43	0.1380	0.0010	1.4141	0.0117	0.0743	0.0005	833	8	1050	25
19.1	66	295	0.50	0.2032	0.0012	2.9132	0.0193	0.1040	0.0007	1193	10	1696	23
20.1	27	418	0.27	0.0659	0.0004	0.5070	0.0037	0.0558	0.0004	411	3	444	28
21.1	105	1675	0.13	0.0659	0.0004	0.5052	0.0030	0.0556	0.0003	411	3	437	26
22.1	13	198	0.43	0.0660	0.0003	0.4992	0.0053	0.0549	0.0006	412	3	408	33
23.1	51	822	0.21	0.0622	0.0003	0.4983	0.0046	0.0581	0.0005	389	3	533	29
B656-1													
1.1	53	767	0.29	0.0525	0.0005	0.4752	0.0054	0.0656	0.0007	410	4	308	22
2.1	148	2673	0.30	0.0526	0.0005	0.3144	0.0031	0.0433	0.0004	273	3	313	20
3.1	44	300	0.31	0.0542	0.0007	0.4867	0.0080	0.0651	0.0007	407	4	380	30
4.1	23	342	0.24	0.0528	0.0006	0.4724	0.0071	0.0650	0.0007	406	5	318	28
5.1	65	997	0.55	0.0553	0.0007	0.4889	0.0081	0.0641	0.0007	400	4	426	30
6.1	20	308	0.36	0.0546	0.0007	0.4815	0.0077	0.0640	0.0007	400	4	394	29
7.1	123	1882	0.33	0.0560	0.0008	0.4836	0.0086	0.0626	0.0008	392	5	452	32
8.1	40	629	0.24	0.0562	0.0006	0.4863	0.0057	0.0628	0.0006	393	4	458	22
9.1	78	1150	0.30	0.0540	0.0006	0.4862	0.0064	0.0653	0.0008	408	5	370	25
10.1	16	270	0.33	0.0544	0.0006	0.4786	0.0051	0.0638	0.0008	399	5	387	23
11.1	29	413	0.27	0.0547	0.0005	0.4874	0.0054	0.0646	0.0007	404	5	399	22
12.1	33	512	0.28	0.0561	0.0006	0.4911	0.0060	0.0635	0.0006	397	4	455	22
13.1	34	540	0.25	0.0555	0.0005	0.4821	0.0057	0.0630	0.0006	394	4	433	22
14.1	18	277	0.37	0.0549	0.0005	0.4793	0.0049	0.0633	0.0007	396	4	408	21
15.1	33	492	0.34	0.0554	0.0006	0.4868	0.0059	0.0637	0.0007	398	4	430	23
16.1	36	539	0.26	0.0551	0.0006	0.4814	0.0056	0.0634	0.0007	396	4	414	23
17.1	48	678	0.45	0.0545	0.0006	0.4848	0.0057	0.0645	0.0007	403	5	394	23
18.1	43	672	0.29	0.0547	0.0006	0.4781	0.0063	0.0634	0.0007	396	4	400	24

3 分析结果和解释

3.1 大干沟南流纹岩 (B743-2)

大干沟南流纹岩 (B743-2) 中的锆石为长柱状晶体, CL 图像显示锆石均发育细密或宽的振荡环带结构 (图 3a), 显示为岩浆成因锆石的特征, Th/U 比值 > 0.1 同样表现出岩浆锆石的同位素地球化学特征。对该岩石样品的 16 颗锆石 16 个测点进行了 U-Pb 同位素测定, 测试结果见表 1 和图 4a。除 20.1 号点测点有明显的铅丢失外, 其余 15 测点全部落在谐和线上或相当邻近谐和线 (图 4a), 而且具有比较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄 (413 ~ 428Ma 之间), 15 个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $423.2 \pm 1.8\text{Ma}$, 解释为流纹岩的喷发年龄。

3.2 水泥厂东流纹岩 (B820-1)

水泥厂东流纹岩 (B820-1) 中的锆石按结构可分为二类。第一类呈椭圆和浑圆状, 锆石普遍发育增生结构 (图 3b), 新生锆石以再生边形式围绕老的锆石内核生长, 与锆石内核之

间具有清晰截然的分界线, 而内核锆石呈浑圆状, 内部结构简单, 不具振荡环带结构, 在 CL 图像中呈灰白色, U 含量和 Th/U 比值低, 呈现变质锆石的 CL 结构特征。表明第一类浑圆状锆石是岩浆喷发过程中直接捕获围岩的锆石, 岩浆喷发前内核锆石及其寄主岩石已经遭受变质作用并形成锆石增生边。第二类锆石多呈半自形短柱状晶体, 在 CL 图像中呈灰色, U 含量和 Th/U 比值高, 可见振荡环带结构, 具有岩浆成因锆石的结构特点。

对该岩石样品的 19 颗锆石 19 个测点进行了 U-Pb 同位素分析 (表 1)。7 个一类浑圆状锆石内核的 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄变化于 920 ~ 2486Ma 之间, 其 Th/U 比值在 0.06 ~ 0.97 之间变化, 应记录了基底岩石年龄信息。12 颗二类岩浆锆石测点皆位于谐和线上 (图 3b), $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄变化于 403 ~ 415Ma 之间, $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $408.2 \pm 2.4\text{Ma}$, 代表了流纹岩的喷发年龄。

3.3 水泥厂北流纹岩 (B705-1)

水泥厂北流纹岩 (B705-1) 中的锆石按结构可分为二类。第一类呈浑圆状和长柱状, 浑圆状锆石内部结构简单, 不具振荡环带结构, 经历了变质重结晶作用 (图 3c); 长柱状锆石

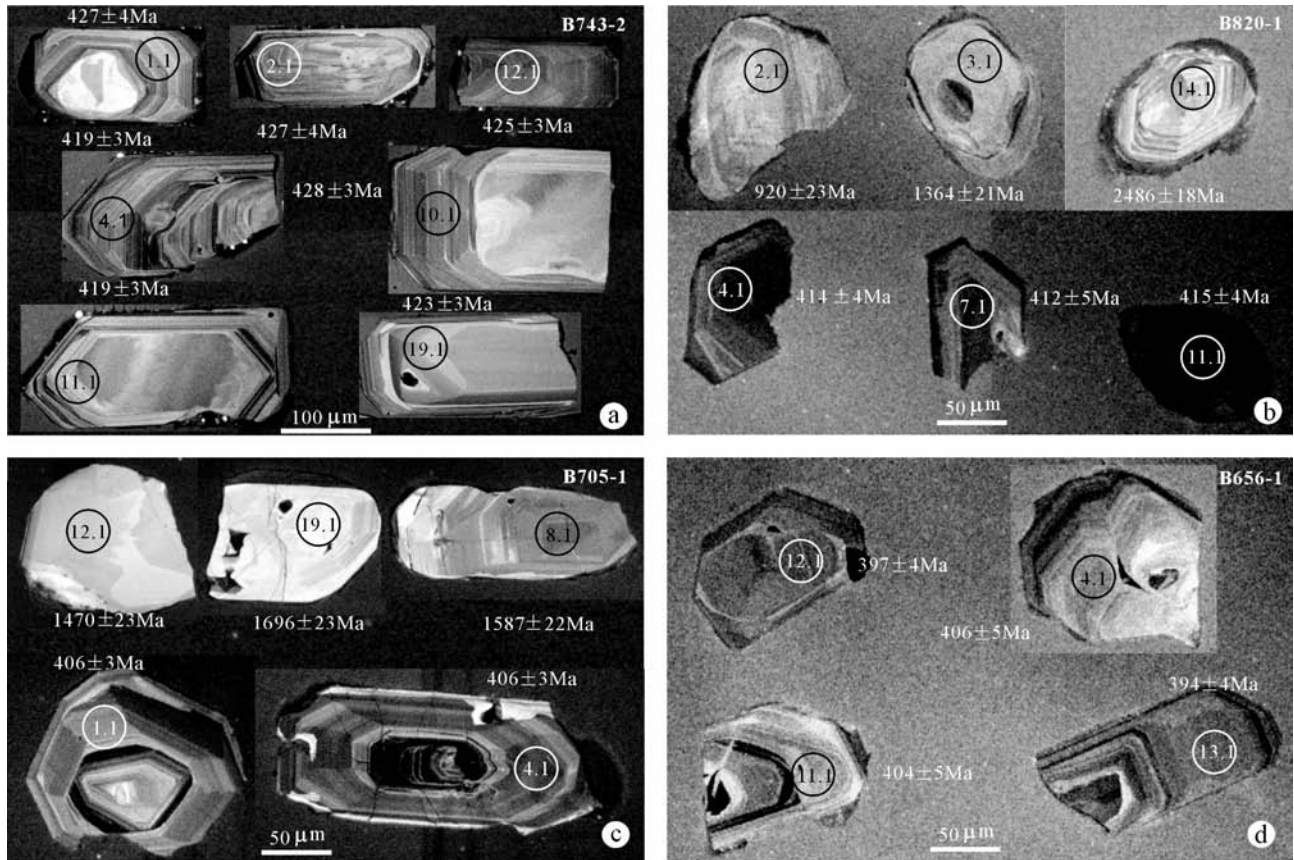


图3 牦牛山组流纹岩的代表性锆石阴极发光图像

Fig. 3 CL images of zircons from rhyolite rocks in Maoniushan Formation

以浅色调和低的 U 含量为特征,保留有不十分清晰的环带结构。第二类锆石多呈半自形短柱状和长柱状晶体,可见振荡环带结构,具有典型岩浆锆石的结构特点,部分锆石含有继承锆石。

对 23 颗锆石 23 个测点进行了 U-Pb 同位素分析(表 1)。6 个一类锆石 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 表面年龄变化于 969 ~ 1760Ma 之间,这些年龄代表了被捕获锆石的年龄。16 个二类锆石测点集中分布于谐和线上或相当邻近谐和线(图 3c),其 $\text{Pb}^{206}/\text{U}^{238}$ 表面年龄的加权平均年龄为 $404.9 \pm 4.8\text{Ma}$,代表了流纹岩的形成年龄。二类岩浆锆石 3.1 测点发生明显的 Pb 丢失,计算年龄时剔除。

3.4 大干沟南流纹岩(B656-1)

大干沟南流纹岩(B656-1)中的锆石为短柱状晶体,少量呈长柱状。CL 图像显示,锆石均发育细密振荡环带结构(图 3d),显示为岩浆成因锆石的特征,Th/U 比值 >0.1 同样表现出岩浆锆石的同位素地球化学特征。对该岩石样品的 18 颗锆石 18 个测点进行了 U-Pb 同位素分析(表 1),18 个测点全部落在谐和线上,除 2 号测点有明显的铅丢失外,其余 17 个测点集中分布于谐和线上或相当邻近谐和线(图 4d),而且具有比较一致的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄(392 ~ 410Ma 之间),17

个测点的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 表面年龄加权平均值为 $399.6 \pm 2.8\text{Ma}$,解释为流纹岩的喷发年龄。

4 结论与讨论

4.1 牦牛山组形成时代

地质填图和综合研究表明(青海省地质矿产局,1997;张雪亭等,2007;李荣社等,2007),牦牛山组广泛分布于中、南祁连山及柴达木盆地周缘,其下部碎屑岩组由砾岩和砂砾岩磨拉石建造组成,上部火山岩组由火山岩及细碎屑岩组成(图 5)。用于确定地层时代依据的化石主要采自火山岩组上部沉积岩夹层中,如在阿木尼克和牦牛山上部细碎屑岩中采到植物化石 *Leptophloeum rhombicum*,在祁漫塔格上部泥质碎屑岩夹层中采到植物化石 *Lepidodendropsis* sp. 及肯得可克地区采得的 *Leptophloeum rhombicum*, *Sublepidodendron mirabile*, *Cyclostigma kiltorkense* 及鱼化石 *Bothriolepinae?* 等化石,由于上述化石多是晚泥盆世标准或常见分子,故认为牦牛山组的地层时代为晚泥盆世。可以看出,由化石确定的地层时代基本上代表了牦牛山组形成时代的上限。

近期的详细地质填图发现,东昆仑水泥厂地区牦牛山组在岩性组合及与上覆、下伏地层接触关系等方面,均与柴北

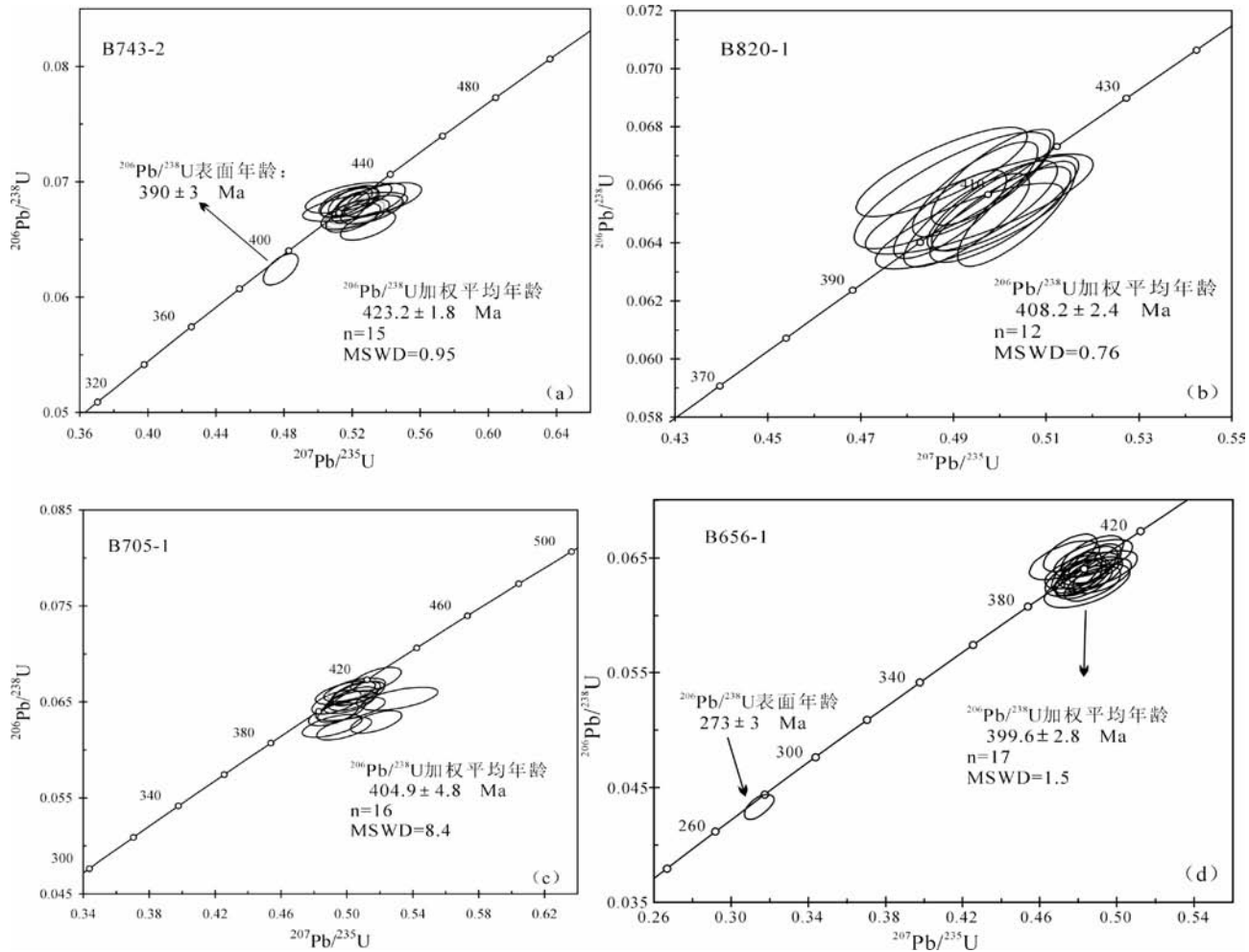


图4 牦牛山组流纹岩锆石 U-Pb 年龄谐和曲线图

Fig.4 The zircon U-Pb concordian diagrams of rhyolite rocks from Maoniushan Formation

缘阿木尼克山、牦牛山及柴南缘肯得可克地区的牦牛山组存在着很大的一致性(图5)。从区域岩性对比来看,水泥厂东分布的中-粗粒碎屑岩夹火山岩组合相当于牦牛山组下部碎屑岩组,直接角度不整合在奥陶纪纳赤台群水泥厂组、石灰厂组和哈拉巴依沟组之上(图1,图2),上部以火山岩为主夹少量沉积岩的火山岩组分布于昆中断裂以北的锯齿山和低山头一带,底部砾岩角度不整合在元古界金水口群变质岩之上,顶部流纹岩与下石炭统大干沟组平行不整合接触。可以看出,水泥厂东碎屑岩组底部砾岩与流纹岩段代表了牦牛山组最下部层位(图5),其形成时代应代表牦牛山组形成时代的下限。

取自牦牛山组碎屑岩组下部磨拉石建造中的四个不同层位火山岩夹层的流纹岩锆石 U-Pb 年龄(400~423Ma)表明,东昆仑水泥厂地区造山后火山-沉积盆地内牦牛山组磨拉石建造形成于晚志留世-早泥盆世,为目前获得的该组最老的年龄,代表了牦牛山组地层沉积时代的下限。而由柴北缘和柴南缘肯得可肯等地区古生物化石确定的地层时代无疑代表了牦牛山组形成时代的上限。因此,分布于中、南祁

连山及柴达木盆地周缘的牦牛山组形成时代是跨纪的(晚志留世-晚泥盆世)。

4.2 东昆仑早古生代洋盆关闭时间

区域地质填图和造山带构造研究表明,东、西昆仑均经历了早古生代的造山作用,而牦牛山组磨拉石建造被认识是早古生代造山作用结束的标志(Pan *et al.*, 1996; 李荣社等, 2007; 许志琴等, 2007)。过去基于对牦牛山组形成时代的认识,普遍认为早古生代造山结束时间为晚泥盆世(Pan *et al.*, 1996; 李荣社等, 2007; 许志琴等, 2007)。然而,磨拉石建造可以形成于多种构造环境(李继亮等, 2009),而只有前陆盆地中最早的磨拉石沉积时代才能代表碰撞造山的结束时间(李继亮等, 1999)。由于目前还不能判断昆仑山牦牛山组磨拉石建造的性质,牦牛山组形成时代只能反映洋盆闭合的时间。最新研究成果表明,东昆仑南缘蛇绿混杂岩带布青山段形成于洋壳俯冲晚期的埃达克岩(锆石 U-Pb 年龄为 402 ± 24 Ma)侵入到早期洋壳俯冲增生楔中,早古生代末俯冲带已后退到阿尼玛卿蛇绿混杂岩带以南(边千韬等, 2007),而不

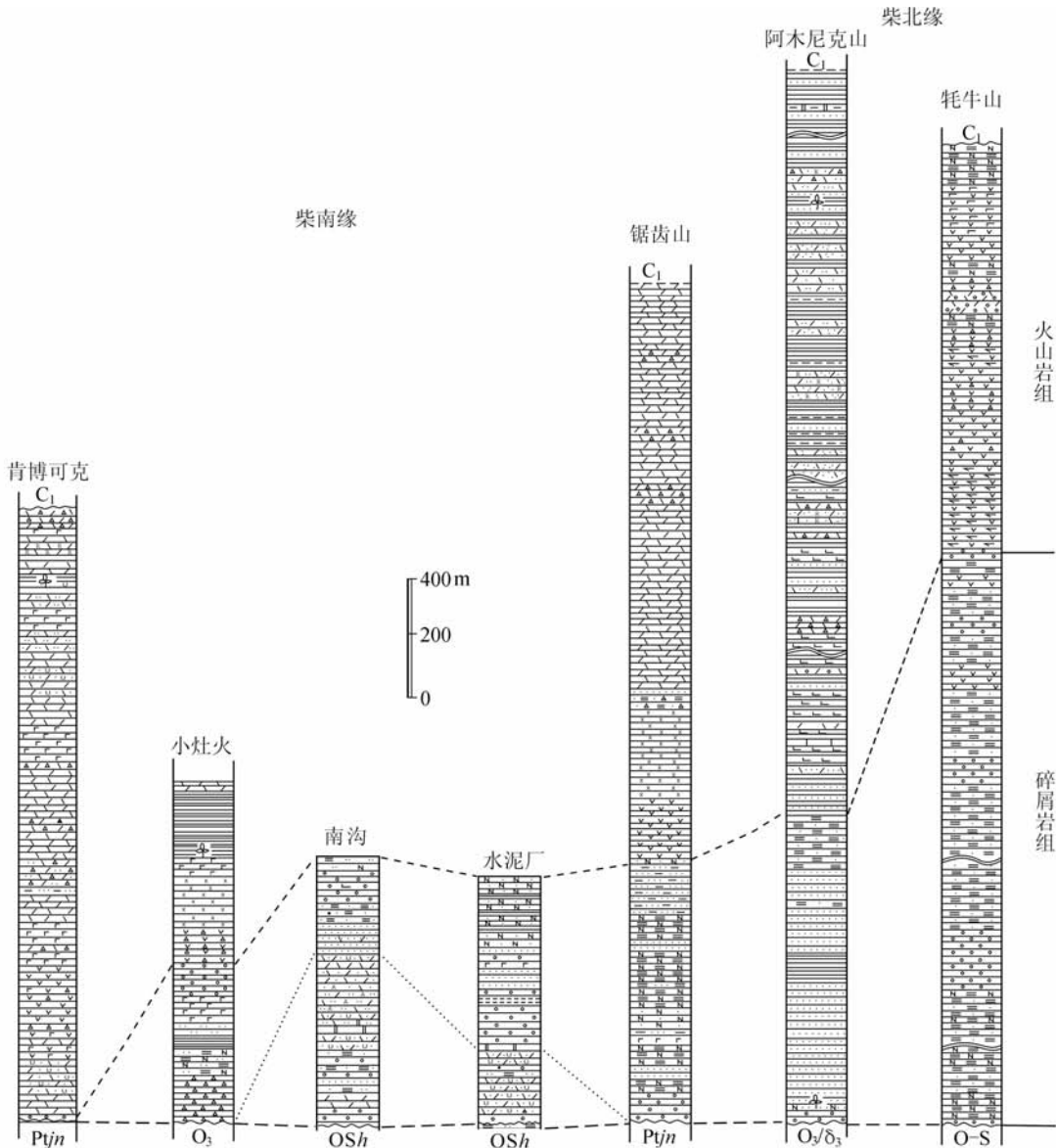


图5 柴达木盆地周缘牦牛山组地层柱状对比图(据青海省地质矿产局,1981 修编)

Fig.5 Strata histogram of Maoniushan Formation in north and south margin of Qaidam basin

整合在早-中奥陶世蛇绿混杂岩带之上厚达 200m 的磨拉石时代可能为中志留世-中泥盆世(边千韬等,2001)。本次研究获得的东昆仑水泥厂地区牦牛山组火山岩锆石 U-Pb 年龄结果表明,牦牛山组底部磨拉石形成于晚志留世-早泥盆世,表明中志留末期洋盆基本闭合,晚志留世-早泥盆世东昆仑主体已经处于隆起状态。这一认识不仅与西昆仑洋盆闭合的时代大致相同(姜耀辉等,1999),还与东昆仑地区与岛弧有关的火山盆地在志留世关闭(Chen *et al.*, 2002)相吻合。

4.3 东昆仑基底时代与构造属性

东昆仑水泥厂地区牦牛山组火山岩中 920 ~ 2486Ma 基底继承锆石的发现,说明东昆仑南地体基底主要为元古代物质,表明东昆仑南地体与扬子板块具有较强的亲缘关系,而

不同于有较多太古代基底物质的华北克拉通板块。柴达木-东昆仑地体和祁连地体变质基底是晋宁期 9 ~ 10 亿年罗迪尼亚超大陆形成时发育起来的观点(Wan *et al.*, 2000)支持这一认识。因此,东昆仑南地体与柴达木地体及祁连地体具有统一的变质基底,并经历了早古生代造山作用的改造。

References

Bian QT, Gao SL, Li DH, Ye ZR, Chang CF and Luo XQ. 2001. A study of the Kunlun-Qilian-Qinling suture system. *Acta Geologica Sinica*, 75:364 - 374

Bian QT, Pospelov II, Li HM, Chang CF and Li JL. 2007. Discovery of the end-Early Paleozoic adakite in the Buqingshan area, Qinhai Province, and its tectonic implications. *Acta Petrologica Sinica*, 23

- (5): 925–934 (in Chinese with English abstract)
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Qinghai Province. 1997. Stratigraphy (Lithostratic) of Qinghai Province. Wuhan: China University of Geosciences Press, 104–111 (in Chinese)
- Chen NS, He L, Sun M, Wang GC and Zhang KX. 2002. Precise timing of the Early Paleozoic metamorphism and thrust deformation in the eastern Kunlun Orogen. Chinese Science Bulletin, 13:76–79
- Hao J, Liu XH and Sang HQ. 2003. Geochemical characteristics and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age of the Ayak adamellite and its tectonic significance in the East Kunlun, Xinjiang. Acta Petrologica Sinica, 19(3):517–522 (in Chinese with English abstract)
- Jiang YH, Rui XJ, Hou JR, Guo KY and Yang WZ. 1999. Tectonic type of Caledonian granitoids and tectonic significance in the West Kunlun Mts. Acta Petrologica Sinica, 15(1):105–115 (in Chinese with English abstract)
- Li HK, Gen JZ, Hao S, Zhang YQ and Li HM. 2009. Research on the dating zircon U-Pb age by LA-MC-ICPMS. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 28 (Suppl.): 77 (in Chinese with English abstract)
- Li JL, Sun S, Hao J, Chen HH, Hou QL, Xiao WJ and Wu JM. 1999. Time limit of collision even of collision orogens. Acta Petrologica Sinica, 15(2):315–320 (in Chinese with English abstract)
- Li JL. 2009. Global tectonic facies: A preclusive opinion. Geological Bulletin of China, 28(10):1375–1381 (in Chinese with English abstract)
- Li RS, Ji WH, Zhao ZM, Chen SJ, Meng Y, Yu PS and Pan XP. 2007. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt. Geological Bulletin of China, 26(4):373–382 (in Chinese with English abstract)
- Pan YS, Zhang YQ, Chen TE, Zhou WM, Xu RH, Wang DA, Xie YW and Luo H. 1996. Feature and evolution of the Early Paleozoic geology in Kunlun Mts. Science in China (Series D), 26(4): 302–307
- Wan YS, Yang JS, Xu ZQ and Wu CL. 2000. Geochemical characteristic of the Maxianshan complex and Xinglongshan Group in the eastern segment of the Qilian orogenic belt. J. Geol. Soc. China (Taiwan), 43(1): 107–124
- Xu ZQ, Yang JS, Li HB, Zhang JX and Wu CL. 2007. Orogenic Plateau: Terrane Amalgamation, Collision and Uplift in the Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Geological Publishing House, 1–458 (in Chinese)
- Zhang XT and Yang SD. 2007. The Regional Geology of Qinghai Province. Beijing: Geological Publishing House: 36–39 (in Chinese)

附中文参考文献

- 边千韬, Pospelov II, 李惠民, 常承法, 李继亮. 2007. 青海省布青山早古生代末期埃达克岩的发现及其构造意义. 岩石学报, 23(5): 925–934
- 郝杰, 刘小汉, 桑海清. 2003. 新疆东昆仑阿牙克岩体地球化学与 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年代学研究及其大地构造意义. 岩石学报, 19(3):517–522
- 姜耀辉, 芮行健, 贺菊瑞, 郭坤一, 杨万志. 1999. 西昆仑山加里东期花岗岩类构造的类型及其大地构造意义. 岩石学报, 15(1):105–115
- 李怀坤, 耿建珍, 郝爽, 张永清, 李惠民. 2009. 用激光烧蚀多接收器等离子体质谱仪(LA-MC-ICPMS)测定锆石 U-Pb 同位素年龄的研究. 矿物岩石地球化学通报, 28(增刊):77
- 李继亮, 孙枢, 郝杰, 陈海泓, 侯泉林, 肖文交, 吴继敏. 1999. 碰撞造山带的碰撞事件时限的确定. 岩石学报, 15(2):315–320
- 李继亮. 2009. 全球大地构造相洽议论. 地质通报, 28(10):1375–1381
- 李荣社, 计文化, 赵振明, 陈守建, 孟勇, 于浦生, 潘小平. 2007. 昆仑早古生代造山带研究进展. 地质通报, 26(4):373–381
- 青海省地质矿产局. 1997. 青海省岩石地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 104–111
- 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 张建新, 吴才来. 2007. 造山的高原——青藏高原地体的拼合、碰撞造山及隆升机制. 北京: 地质出版社: 1–458
- 张雪亭, 杨生德. 2007. 青海省区域地质概论. 北京: 地质出版社, 36–39