

东昆仑东段哈拉郭勒—哈图一带 中生代的岩石隆升剥露 ——锆石和磷灰石裂变径迹年代学证据

王国灿¹, 向树元¹, John I. Garver², Robert P. Wintsch³, Mary Roden-Tice⁴

(1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074; 2. Department of Geology, Olin Center, Union College, Schenectady, New York 12308-2311, USA; 3. Department of Geological Sciences, Geology Building, Indiana University, Bloomington, Indiana 47405-1403, USA; 4. Earth and Environment Sciences, State University of New York at Plattsburgh, Plattsburgh, NY 12901, USA)

摘要: 根据对东昆仑地区东段哈拉郭勒—哈图一带不同高度基岩的系列锆石裂变径迹年龄分析, 结合磷灰石裂变径迹年龄分析和中酸性侵入岩角闪石压力计分析揭示了东昆仑东段中生代的岩石隆升剥露冷却历史。巴隆哈图一带中酸性侵入岩角闪石压力计分析结果反映晚海西—印支期以来的总体剥露幅度约 8~9 km, 早二叠世至晚三叠世初剥蚀作用极为缓慢, 大约为 20~40 m/Ma。不同高程样品的锆石裂变径迹年龄分析结果揭示了东昆仑地区东段在中晚侏罗世处于缓慢的岩石隆升剥露阶段, 其中中侏罗世相对较快, 抬升速率 77~88 m/Ma, 晚侏罗世相对较慢, 抬升速率小于 37 m/Ma, 且呈减慢趋势, 这种减慢趋势反映了早中侏罗世之交强构造抬升期后的逐渐衰退。锆石裂变径迹—磷灰石裂变径迹年龄分析结果反映了中侏罗世以来的剥蚀速率一般不超过 55 m/Ma, 岩石的剥蚀速率与岩石的抬升速率基本为同一量级, 中侏罗世—白垩纪剥蚀作用与岩石抬升作用基本处于平衡状态。

关键词: 东昆仑东段; 中生代; 隆升剥露; 锆石和磷灰石裂变径迹年代学。

中图分类号: P542; P597 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-2383(2003)06-0645-08

作者简介: 王国灿(1963—), 男, 教授, 1997年在中国地质大学(武汉)获博士学位, 长期从事构造学的教学与研究工作, 近年主要从事造山带地质和构造年代学研究。

E-mail: wgcan@cug.edu.cn

长期以来, 对青藏高原隆升作用的研究较多地集中于新第三纪以来高原地貌的抬升崛起过程, 其中有不少研究成果涉及高原北缘的东昆仑造山带^[1~6]。然而, 东昆仑地区东段早在晚三叠世就已脱离海侵而进入陆内演化阶段, 晚三叠世脱离海侵以来的中生代时期的剥露过程由于沉积纪录的缺乏或不完整而知之甚少, Mock 等^[7]曾通过对格尔木南侧东昆仑地区的花岗质岩石的⁴⁰Ar/³⁹Ar热年代学研究揭示了大约 120~140 Ma 发生了一次重要的构造热事件, 但总的说来对中生代的隆升剥露作用的约束极为有限。

近年来, 我们在国家自然科学基金项目和国土资源大调查地质填图项目的资助下, 对东昆仑地区东段哈图一带和哈拉郭勒南侧不同高度的基岩进行了系列锆石和磷灰石裂变径迹年龄分析, 获得的结果揭示了这一地区侏罗纪—早白垩世间的岩石隆升剥露冷却历史。

1 地质背景

研究区位于东昆仑东段诺木洪郭勒—哈拉郭勒—哈图一带(图 1), 基岩广泛出露, 大致以东昆中构造带为界, 北部的东昆北构造带主要分布加里东期、海西—印支期不同时代花岗质岩系, 其中包含大小不一的一些前寒武纪基底变质岩系的残留块体; 南

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 40072062); 中国地质调查局 1: 25 万阿拉克湖幅区域地质调查项目(No. 19991300004021)。

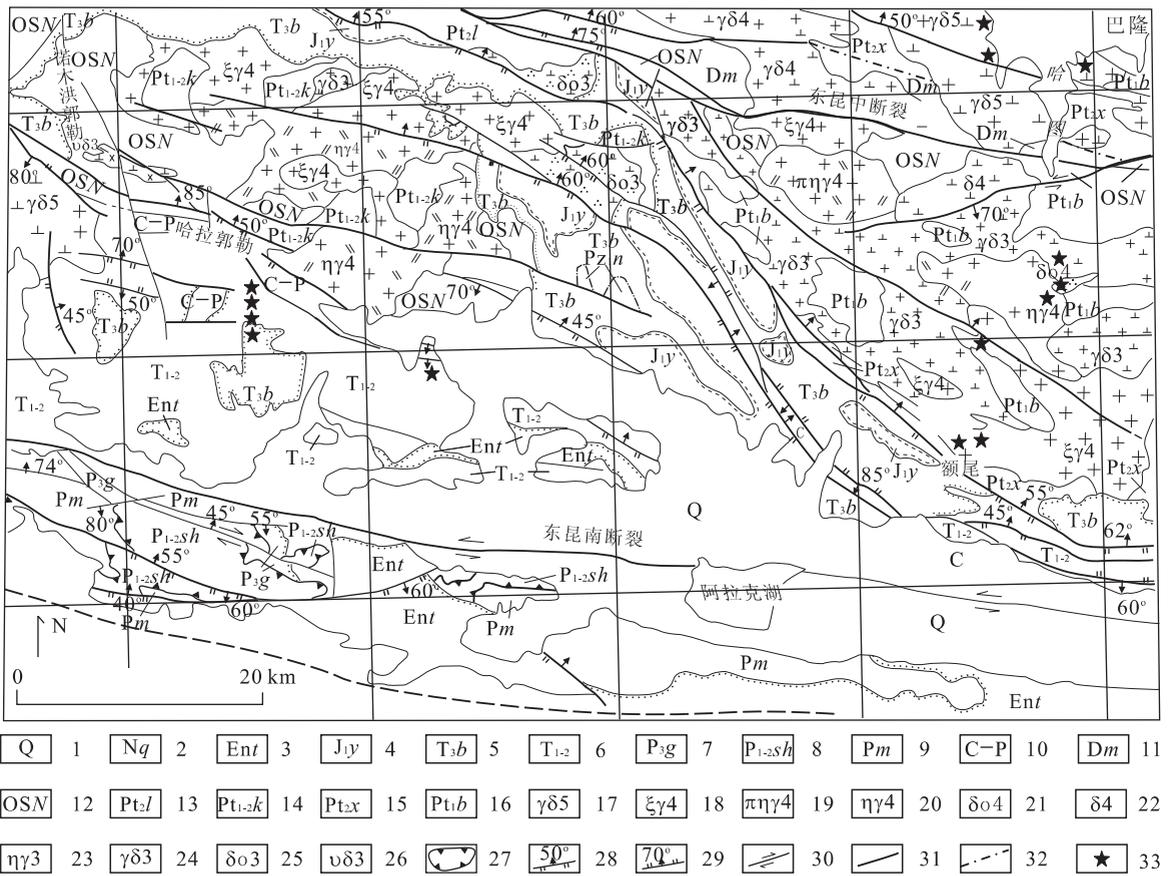


图 1 东昆仑东段诺木洪郭勒—哈拉郭勒—哈图一带地质简图

Fig. 1 Geological sketch map in Nuomuhongguole—Halaguole—Hatu area, eastern Kunlun

1. 第四系; 2. 新第三纪曲果组; 3. 第三纪沱沱河组; 4. 早侏罗世羊曲组; 5. 晚三叠世八宝山组; 6. 早中三叠世洪水川组、闹仓坚沟组; 7. 晚二叠世格曲组; 8. 早中二叠世树维门科组; 9. 早中二叠世马尔争组; 10. 石炭纪—二叠纪哈拉郭勒组、浩特洛洼组; 11. 泥盆纪托牛山组; 12. 奥陶纪—志留纪纳赤台群; 13. 中元古代狼牙山组; 14. 古中元古代苦海杂岩; 15. 中元古代小庙岩群; 16. 古元古代白沙河岩群; 17. 印支期花岗岩闪长岩; 18. 海西期钾长花岗岩; 19. 海西期似斑状二长花岗岩; 20. 海西期二长花岗岩; 21. 海西期石英闪长岩; 22. 海西期闪长岩; 23. 加里东期二长花岗岩; 24. 加里东期花岗闪长岩; 25. 加里东期石英闪长岩; 26. 加里东期辉石闪长岩; 27. 推覆构造; 28. 逆断层及产状; 29. 正断层及产状; 30. 平移断层; 31. 性质不明断层; 32. 韧性剪切带; 33. 样品位置

部的东昆南构造带结构较为复杂,基岩类型丰富,根据地层接触关系可划分出 6 个构造层:(1)古中元古代基底岩系—苦海杂岩:由黑云斜长(二长)片麻岩、眼球状黑云二长片麻岩、大理岩及少量角闪石岩、阳起石岩透镜体等构成;(2)早古生代纳赤台群:为一套蛇绿构造混杂岩系,岩石组合包括变枕状玄武岩、碳酸盐岩、变中基性火山熔岩、变火山碎屑岩、变碎屑岩及少量超镁铁岩、硅质岩;(3)晚古生代滨浅海盖层沉积:包括早石炭世哈拉郭勒组和石炭纪—二叠纪浩特洛洼组,总体为一套滨浅海相的碎屑岩和含生物的碳酸盐岩建造,少量火山岩建造;(4)早中三叠世上叠边缘海裂谷盆地沉积:包括早中三叠世洪水川组和中三叠世闹仓坚沟组,其中洪水川组下部主要为一套滨浅海相陆源碎屑岩建造,上部主要

为一套火山凝灰岩、玄武安山岩及碎屑岩。闹仓坚沟组总体为一套浅海碳酸岩系夹有一些火山凝灰岩及碎屑岩;(5)晚三叠—早侏罗世陆相火山—碎屑含煤盆地:包括晚三叠世八宝山组和早侏罗世羊曲组,八宝山组下部主要为一套粗碎屑岩组合,包括紫红色复成分砾岩、砂岩夹流纹岩、凝灰岩等,上部为钙泥质粉砂岩、砂岩、碳质粉砂质页岩夹煤线,羊曲组为一套灰—灰绿色陆相砾岩、砂岩、粉砂岩、泥岩含煤;(6)第三纪沱沱河组:主要发育沱沱河组下段,总体为暗紫色复成分砾岩、砂岩。除这些地层单元外,尚有更多的侵入岩出露,主要有加里东期花岗闪长岩、辉石闪长岩、石英闪长岩及海西期二长花岗岩、钾长花岗岩等。

地层沉积建造及接触关系显示,研究区于中三

叠世末即脱离海侵而进入陆内环境,晚三叠世八宝山组—早侏罗世羊曲组陆相火山—碎屑含煤建造角度不整合于下伏的不同时代岩系之上,中晚侏罗世—白垩纪地层缺失。

2 分析方法和样品分布

为了揭示研究区中生代的隆升剥露历史,选取地形高差较大的额尾—哈图和哈拉郭勒南侧的阿布特哈达—哈拉郭勒进行裂变径迹年龄样品的系统采集。哈图一带的锆石裂变径迹年龄样品来自不同时代的花岗岩,从海拔高度 5 230 m 的布尔汗布达山主脊向北至 3 260 m 的昆仑山与柴达木盆地的交界地带。哈拉郭勒南侧裂变径迹年龄样品来自早中三叠世洪水川组火山岩和闹仓坚沟组砂岩及角度不整合其上的晚三叠世八宝山组砂岩,海拔高度从 5 040 m 的夷平面向北迅速下降到约 4 200 m 的哈拉郭勒沟,其中样品 0335—1 为不整合面以上的晚三叠世八宝山组砂岩。各样品的分布及高程见图 1。

裂变径迹年龄分析采用锆石颗粒裂变径迹年龄

法^[8~11],对于花岗岩和火山岩样品,由于其不同颗粒经历了相同的热历史,不同颗粒的裂变径迹年龄大体一致,一般形成单峰年龄分布,其峰值年龄相当于中值年龄,因此所需测量的颗粒较少,所测颗粒数 10~30 不等。而碎屑颗粒裂变径迹年龄,由于可能来自不同源区,可能经历了不同的热历史,为揭示不同的年龄构成,需要统计较多的颗粒年龄(一般在 50 个颗粒以上),以达到其统计学意义^[8,9]。测试结果见表 1,2,样品测试在美国 Union College 地质系裂变径迹实验室完成。

另外,为了获得研究区晚三叠世以来的总的剥露幅度,对哈图一带的一时代为晚三叠世的花岗闪长岩和一时代为早二叠世的闪长岩进行角闪石结晶压力估算。岩体的结晶压力在没有构造或流体超压的条件下与侵位深度存在一定的关系,测区晚三叠世总体为伸展环境,早二叠纪南侧阿尼玛卿洋盆也处于扩张时期,东昆仑地区也不存在强烈的构造动力作用,因此,这 2 个时期构造超压及流体超压甚微,通过对岩浆结晶压力的估算可获得剥露幅度的信息。Johnson和Rutherford^[12]通过实验研究所提

表 1 研究区不同高程基岩锆石裂变径迹年龄测试结果

Table 1 Results of zircon fission track age dating in Hatu and Halaguole area, eastern Kunlun Mountains

样品编号	样点海拔/m	岩石类型	时代或层位	颗粒数	中值年龄/Ma	χ^2 年龄/Ma	P_1 年龄峰值/Ma	P_2 年龄峰值/Ma	P_3 年龄峰值/Ma
1213-1*	3 260	花闪长岩	225 Ma	15	157.5 (-6.9/+7.2)	158.3 (-6.5/+6.7)	158.4(100.0%) (-6.5/+6.7)		
P3-11-1*	3 660	石英闪长岩	280 Ma	15	156.1 (-7.5/+7.9)	156.1 (-7.2/+7.6)	156.2(100.0%) (-7.2/+7.6)		
P3-9-1*	3 749	二长花岗岩	430 Ma	10	152.0 (-7.1/+7.4)	152.0 (-7.1/+7.4)	152.0(100.0%) (-7.1/+7.4)		
P3-0-2*	4 334	钾长花岗岩		12	172.4 (-7.3/+7.6)	172.4 (-7.3/+7.6)	172.4(100.0%) (-7.3/+7.6)		
2503-1*	4 860	钾长花岗岩	351Ma	13	179.2 (-7.8/+8.1)	179.8 (-7.1/+7.4)	179.9 (-7.1/+7.4)		
0387-1*	5 130	钾长花岗岩		27	181.1 (-7.9/+8.2)	182.3 (-6.9/+7.2)	182.4(100%) (-6.9/+7.2)		
0335-1	5 040	砂岩	T _{3b}	45	179.9 (-7.7/+8.0)	173.5 (-6.3/+6.5)	170.3(86.6%) (-6.9/+7.2)	277.0(13.4%) (-31.5/+35.4)	
0336-2	4 750	火山岩		15	168.7 (-8.3/+8.7)	168.6 (-8.3/+8.7)	168.7(100.0%) (-8.3/+8.7)		
0336-1	4 870	火山岩	T _{1-2h}	22	164.8 (-8.4/+8.8)	164.7 (-8.4/+8.8)	164.8(100.0%) (-8.4/+8.8)		
0337-1	4 320	火山岩		19	160.9 (-6.6/+6.9)	160.9 (-6.6/+6.9)	160.9(100.0%) (-6.6/+6.9)		
P16	4 200	砂岩	T _{2n}	75	171.5 (-7.2/+7.5)	151.5 (-4.8/+5.0)	148.2(53.6%) (-6.8/+7.1)	193.3(40.4%) (-12.9/+13.8)	468.4(6.0%) (-48.9/+54.4)

注:误差为 65%置信度;带*的样品采自哈图一带,其余均采自哈拉郭勒南侧。

表 2 哈图一带不同高程基岩磷灰石裂变径迹年龄测试结果

Table 2 Results of apatite fission track age dating in Hatu and Halaguole area, eastern Kunlun Mountains

样品编号	样点海拔/m	岩性	侵入时代	测量颗粒数	中值年龄/Ma	χ^2 年龄/Ma
1213-1	3 260	花岗闪长岩	T ₃ (225 Ma)	20	82.3(-9.4/+10.6)	82.9(-8.7/+9.7)
P3-0-2	4 334	花岗闪长岩	S ₁ (430 Ma)	20	98.2(-17.5/+21.3)	88.8(-11.9/+13.7)
0387-1	5 130	钾长花岗岩	C ₁ (351 Ma)	20	92.8(-12.0/+13.7)	92.9(-11.8/+13.4)

注:误差为 95%置信度。

表 3 哈图一带中酸性侵入岩中角闪石全铝压力计算结果

Table 3 Geobarometer calculating of the hornblende of the intermediate-acidic intrusive rocks in Hatu area, Eastern Kunlun Mountains

序号	样品编号	岩性	时代	$n(\text{Ti})$	$n(\text{Si})$	$n(\text{Al}^{\text{T}})$	结晶压力/ (10 ² MPa)	推算结晶 深度/km
				0.007	7.881	0.150	-2.83	
1	1208-1	花岗闪长岩		0.016	7.786	0.229	-2.49	
				0.017	7.807	0.203	-2.60	
				0.008	7.868	0.139	-2.87	
				0.123	6.994	1.285	1.97	6.8
2	1213-1	花岗闪长岩	T ₃ (225~229 Ma)	0.075	7.154	1.079	1.10	3.8?
				0.055	7.492	0.695	-0.52	
				0.111	7.007	1.229	1.74	6.0
				0.158	6.922	1.321	2.13	7.3
3	1216-1	花岗闪长岩		0.167	6.686	1.620	3.39	11.7
				0.148	6.986	1.198	1.61	5.5
				0.159	6.816	1.444	2.64	9.1
				0.149	6.809	1.454	2.69	9.3
4	P3-11-1	石英闪长岩		0.172	6.725	1.627	3.42	11.8
			P ₁ (280 Ma)	0.194	6.702	1.511	2.93	10.1
				0.117	6.601	1.861	4.41	15.2
				0.139	6.940	1.395	2.44	8.4
5	P3-17-6	石英闪长岩		0.162	6.799	1.567	3.17	10.9
				0.162	6.832	1.472	2.77	9.6

注:侵位深度换算时取地壳平均密度 2.9 g/cm³; n 为原子数,下同。

出的花岗岩类钙质角闪石全铝压力计使我们可以对
中酸性岩体的侵位深度进行限定,并进而探讨其剥
露过程^[13]。对上述两岩体的角闪石进行电子探针成
分分析,利用钙质角闪石成因类型判别图解对角闪
石进行成因类型判别,确定适于进行角闪石压力计
估算的成分点,即落入酸性岩浆结晶角闪石区(A
区)的成分点,然后利用 Johnson 等^[12]提出的钙质
角闪石全铝压力计计算式: $p=4.23 n(\text{Al}^{\text{T}})-3.46$,
对酸性岩浆结晶角闪石的结晶压力进行估算,估算
结果见表 3。

3 岩体侵位深度的估算

哈图一带的晚三叠世花岗闪长岩的一件样品
1208-1 的角闪石在 Ti-Si 图解上均落入 C 区,即次

生交代角闪石区(图 2),显示出经受了明显的次生
交代作用,不能进行角闪石压力计算;另一件花岗闪
长岩样品 1213-1 中一个成分点明显落入次生交代
角闪石区(图 2),另一点落在次生交代角闪石区和
酸性岩浆结晶角闪石区的交界地带,显示也遭受一
定次生交代的影响,估算结果偏小,其他 2 个角闪石
颗粒成分点落入酸性岩浆结晶角闪石区,结晶压力
分别为 1.74×10^8 Pa 和 1.97×10^8 Pa,相当的岩体
侵位深度为 6~7 km。1216-1 号样品的 4 个角闪石
颗粒成分点均落入酸性岩浆结晶角闪石区(图 2),
估算的岩浆结晶压力平均值为 2.44×10^8 Pa,相当
的岩体侵位深度为 8.4 km。因此晚三叠世花岗闪长
岩的侵位深度大体为 8 km 左右。哈图沟南端的石英
闪长岩的一件样品(P3-11-1)4 个角闪石颗粒成
分点的 3 个落入或偏向深源捕虏晶区(B区)(图 2),

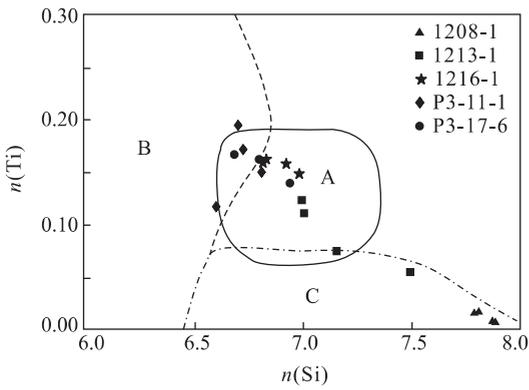


图 2 哈图一带中酸性侵入岩体 $n(\text{Ti})-n(\text{Si})$ 图解

Fig. 2 $n(\text{Ti})-n(\text{Si})$ diagram of the intermediate-acidic intrusive rocks in Hatu area

A. 酸性岩浆结晶的角闪石; B. 深源捕虏晶; C. 次生交代角闪石

代表岩浆就位过程中结晶较早的角闪石,不能反映就位深度,只有 1 个成分点落入 A 区,其结晶压力为 2.69×10^8 Pa,相当的结晶深度为 9.3 km,可作为岩体侵位深度的上限;另一件石英闪长岩样品(P3-17-6)3 个角闪石颗粒成分点中的 2 个落在 A 区和 B 区过渡带,显示出一定深源捕虏晶特点,另一落入 A 区的角闪石估算的结晶压力为 2.44×10^8 Pa,相当的结晶深度为 8.4 km,大体可代表岩体的侵位深度.因此,早二叠世石英闪长岩的侵位深度约为 8~9 km.

总之,哈图一带晚海西—印支期以来的总体剥露幅度约 8~9 km.此外,早二叠世石英闪长岩与晚三叠世的花岗闪长岩即便算上两岩体间现在的高度差,其侵位深度差值也仅 1~2 km,反映早二叠世至晚三叠世期间极为缓慢的剥蚀速率,大约为

20~40 m/Ma.

哈图一带花岗岩区的锆石裂变径迹颗粒年龄分析显示,各样品均为单峰分布,峰值年龄、中值年龄和 χ^2 年龄具有良好的一致性,说明尽管各样品的形成时代存在差异,但各样品在中生代时期冷却经过锆石裂变径迹封闭温度等温面后再没有因为后期的构造—热事件而发生热重置或部分热重置,同一样品的不同锆石颗粒由于形成时物理化学条件较均一,因此其铀含量大体一致,形成的裂变径迹在其经历的热历史过程中具有类似的热行为,由此,各样品记录的锆石裂变径迹中值年龄可以反映样品冷却经过锆石裂变径迹封闭温度等温面的时间.如果不同样品在同一块体内受统一的隆升—剥露—冷却过程的控制,那么裂变径迹年龄与样点海拔高程之间的关系就能反映该块体的一段隆升—剥露历史.综合各样品的高程和年龄关系,可以看出,除 1213-1 号样品明显偏离外,其他 5 件相对集中的样品的锆石裂变径迹年龄与海拔高程总体存在明显的正相关关系,即随海拔高程的增高而增大(表 1,图 3a),假定等温面保持不变,利用线性回归计算出的 152~181 Ma 间的绝对平均抬升速率约为 47.2 m/Ma.另外,从图 3a 还可以看出,较早期(181~172 Ma 间)平均抬升速率约 88 m/Ma,而较晚期(172~152 Ma 间)平均抬升速率约 37 m/Ma,特别是 2 件相对较低海拔的样品(P3-9-1 和 P3-11-1)所反映的锆石裂变径迹年龄在 152~156 Ma 间几乎没有抬升,此时已逐渐转为稳定.1213-1 号样品的明显偏离与它和其他 5 件样品相距较远分属不同的块体有关,其间为东昆中断裂分隔.

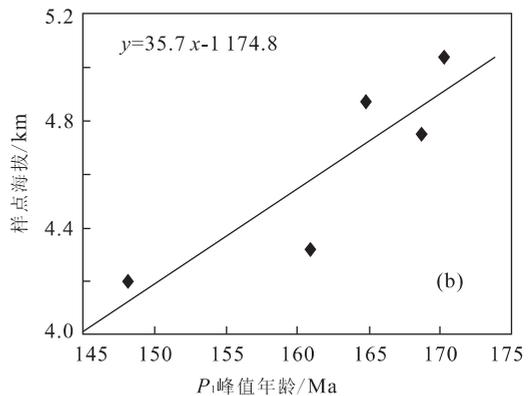
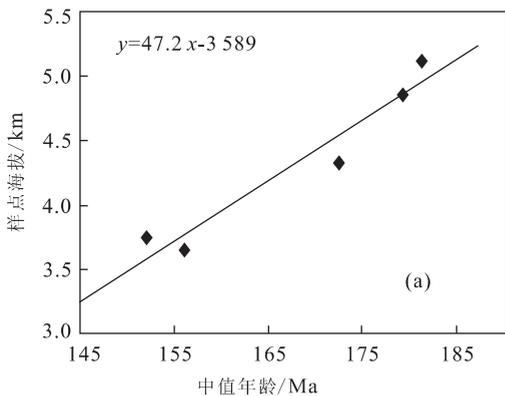


图 3 哈图一带侵入岩(a)、哈拉郭勒沟南侧三叠纪碎屑岩及火山岩(b)中锆石裂变径迹年龄随高程的变化

Fig. 3 Diagram showing the relationship between zircon fission track ages of the pluton and the sample elevation in Hatu area (a), the Triassic clastic rocks or volcanic rocks and the sample elevation in Halaguole area(b)

结合磷灰石裂变径迹年龄(表 2),东昆中断裂北侧 1213-1 号样品反映的 157.5~82.3 Ma 间的平均冷却速率为 1.6 °C/Ma,假如冷却是由剥露引起,以地温梯度 30 m/km 计,换算的剥蚀速率为 53.3 m/Ma,82.3 Ma 以来的平均冷却速率为 1.2 °C/Ma,换算的剥蚀速率为 40 m/Ma;东昆中断裂以南的 P3-0-2 号样品反映的 172.4~98.2 Ma 间的平均冷却速率为 1.6 °C/Ma,换算的剥蚀速率为 53.3 m/Ma,98.2 Ma 以来的平均冷却速率为 1.0 °C/Ma,换算的剥蚀速率为 33 m/Ma;0387-1 号样品反映的 181.1~92.8 Ma 间的平均冷却速率为 1.4 °C/Ma,换算的剥蚀速率为 47 m/Ma,92.8 Ma 以来的平均冷却速率为 1.0 °C/Ma,换算的剥蚀速率为 33 m/Ma.不同样品纪录的岩石剥蚀速率相似,即平均剥蚀速率介于 33~53 m/Ma,且中侏罗世—早白垩世略快,为 47~53 m/Ma,而晚白垩世以来为 33~40 m/Ma.

阿布特哈达—哈拉郭勒一带锆石裂变径迹颗粒年龄分析显示(表 1,图 3b),2 件火山岩样品的锆石裂变径迹颗粒年龄具有良好的单峰年龄分布,且中值年龄、 χ^2 年龄和峰值拟合年龄具有良好的一致性,反映不同测年颗粒的铀含量大体一致,形成的裂变径迹在其经历的热历史过程中具有类似的热行为,而 2 件砂岩样品具有较复杂的颗粒年龄构成,反映碎屑锆石的不同来源和不同成因,较老的峰值年龄(P_2 和 P_3)反映的是一些具有低铀含量的古老锆石在后期构造热事件中裂变径迹未受到彻底的热重置,峰值年龄数据不具备更多的地质意义.而最小的峰值年龄(P_1)反映的是样品剥露冷却最后一次离开锆石裂变径迹封闭温度等温面或经受最后一次构造热事件后冷却离开锆石裂变径迹封闭温度等温面的时间,因此在进行冷却历史分析时,最小的峰值年龄(P_1)具有最重要的热历史信息.这样,根据峰值拟合年龄 P_1 与样点海拔高程之间的关系得出 148~170 Ma 间的平均抬升速率为 35.7 m/Ma(图 3b).另外从图 3b 也可看出抬升速率减慢的趋势,170~160 Ma 间具有相对较快的抬升,抬升速率约 77 m/Ma,而 160~148 Ma 间抬升速率极为缓慢,约 9 m/Ma.

4 结论与讨论

综上所述可以概括出以下结论和推论.(1)哈图一带晚海西—印支期以来的总体剥露幅度约 8~9 km.早二叠世至晚三叠世初为剥蚀作用极为缓慢

阶段,为 20~40 m/Ma.这种低速缓慢剥蚀阶段说明,当时哈图一带不应出现很大的地貌反差,而可能反映了当时的近海地带的较平缓地势.在二叠纪—中二叠世,其南部不远的东昆南地区广泛发育海侵地层,尽管早三叠世洪水川组与下伏地层间存在区域性的角度不整合,但看来并没有造成长期快速抬升剥露的巨型山系.(2)2 个地形剖面的系列样品的锆石裂变径迹年龄分析结果都揭示了东昆仑地区在中晚侏罗世处于缓慢的隆升剥露阶段,其中中侏罗世相对较快,抬升速率 77~88 m/Ma,晚侏罗世相对较慢,抬升速率小于 37 m/Ma,且呈越来越慢趋势.这种抬升作用的减慢趋势预示着在中侏罗世早期或早侏罗世晚期存在一个构造强抬升时期,这一构造强抬升时期应对应着晚三叠世八宝山组—早侏罗世羊曲组构造层的褶皱冲断变形,锆石裂变径迹所记录的中晚侏罗世的抬升历史可能是早、中侏罗世之交构造抬升期后的逐渐衰退.(3)锆石裂变径迹结合磷灰石裂变径迹测试结果反映的中侏罗世以来的剥蚀速率也很缓慢,一般不超过 55 m/Ma.岩石的剥蚀速率与锆石裂变径迹年龄—高差法推算的岩石抬升速率基本为同一量级,也就是说至少在中侏罗世—白垩纪期间剥蚀作用与岩石抬升作用基本处于平衡状态,反映了当时的一种相对稳定的构造状态.

参考文献:

- [1] 崔之久,高全洲,刘耕年,等.夷平面、古岩溶与青藏高原隆升[J].中国科学(D辑),1996,26(4):378-386.
CUI Z J, GAO Q Z, LIU G N, et al. Planation surfaces, palaeokarst and uplift of Xizang (Tibet) plateau [J]. Science in China (Series D), 1996, 26(4): 378-386.
- [2] 崔之久,伍永秋,刘耕年,等.关于“昆仑—黄河运动”[J].中国科学(D辑),1998,28(1):53-59.
CUI Z J, WU Y Q, LIU G N, et al. On Kunlun-Yellow River tectonic movement [J]. Science in China (Series D), 1998, 28(1): 53-59.
- [3] 施雅风,李吉均,李炳元,等.晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化[J].地理学报,1999,54(1):10-54.
SHI Y F, LI J J, LI B Y, et al. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and east Asia environmental change during Late Cenozoic [J]. Acta Geographica Sinica, 1999, 54(1): 10-54.
- [4] 李吉均,方小敏,马海州,等.晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆起[J].中国科学(D辑),1996,26(4):316-322.
LI J J, FANG X M, MA H Z, et al. Geomorphological

- and environmental evolution in the upper reaches of the Yellow River during the Late Cenozoic [J]. *Science in China(Series D)*, 1996, 26(4): 316—322.
- [5] 李长安,殷福禧,于庆文. 东昆仑山构造隆升与水系演化及其发展趋势[J]. *科学通报*, 1999, 44(2): 211—213.
LI C A, YIN H F, YU Q W. Evolution of drainage systems and its development trend in connection with tectonic uplift of eastern Kunlun Mt [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(2): 211—213.
- [6] 王国灿,侯光久,张克信,等. 东昆仑东段中更新世以来的成山作用及其动力转换[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(1): 4—12.
WANG G C, HOU G J, ZHANG K X, et al. Mountain building and its dynamic transition since Middle Pleistocene in the east of eastern Kunlun, northeast Tibetan plateau [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(1): 4—12.
- [7] Mock C, Arnaud N O, Cantagrel J M. An early unroofing in northeastern Tibet? Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ thermochronology on granitoids from the eastern Kunlun range (Qinghai, NW China) [J]. *Earth and Planetary Science Letter*, 1999, 171: 107—122.
- [8] 王国灿. 沉积物源区剥露历史分析的一种新途径——碎屑锆石和磷灰石裂变径迹热年代学[J]. *地质科技情报*, 2002, 21(4): 35—40.
WANG G C. A new approach to determine the exhumation history of the sediment provenance—Detrital zircon and apatite fission-track thermochronology [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2002, 21(4): 35—40.
- [9] Garver J I, Brandon M T, Roden-Tice M, et al. Exhumation history of orogenic highlands determined by detrital fission-track thermochronology [A]. In: Ring U, Brandon M T, Willett S, et al, eds. *Exhumation processes: Normal faulting, ductile flow and erosion* [C]. London: Geological Society of London Special Publication, 1999, 154: 283—304.
- [10] Brandon M T. Probability density plot for fission-track grain-age samples [J]. *Radiation Measurements*, 1996, 26(5): 663—676.
- [11] Bernet M, Zattin M, Garver J I, et al. Steady state exhumation of the European Alps [J]. *Geology*, 2001, 29(1): 35—38.
- [12] Johnson M C, Rutherford M J. Experimental calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley Caldera (California) volcanic rocks [J]. *Geology*, 1989, 17: 837—841.
- [13] 马昌前,杨坤光,唐仲华,等. 花岗岩类岩浆动力学——理论方法及鄂东花岗岩类例析[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 1994. 169—175.
MA C Q, YANG K G, TANG Z H, et al. *Magma-dynamics of granitoids—Theory, method and a case study of the eastern Hubei granitoids* [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1994. 169—175.

Uplift and Exhumation during Mesozoic in Halaguole-Hatu Area, East Segment of Eastern Kunlun Mountains: Evidence from Zircon and Apatite Fission-Track Ages

WANG Guo-can¹, XIANG Shu-yuan¹, John I. Garver², Robert P. Wintsch³, Mary Roden-Tice⁴
(1. *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China*; 2. *Department of Geology, Olin Center, Union College, Schenectady, New York 12308-2311, USA*; 3. *Department of Geological Sciences, Geology Building, Indiana University, Bloomington, Indiana 47405-1403, USA*; 4. *Earth and Environment Sciences, State University of New York at Plattsburgh, Plattsburgh, NY 12901, USA*)

Abstract: This paper discusses the uplift and exhumation processes during Mesozoic in Halaguole-Hatu area, east segment of the eastern Kunlun, by dating the zircon and apatite fission-track ages and geobarometer analysis of the hornblende of intermediate-acidic intrusive rocks. The geobarometer analysis of the hornblende of intermediate-acidic intrusive rocks in Hatu area illustrates that the total exhumation

tion range is about 8—9 km since the Late Hercynian-Indosinian, which happened very slowly, about 20—40 m/Ma, from the Early Permian to the early stage of the Late Triassic. While the zircon fission-track age dating of the samples from different elevations reveals a slow uplift process during the Middle and Late Jurassic. The uplift rate in the Middle Jurassic, 77—88 m/Ma, is correspondingly faster than that in the Late Jurassic, less than 37 m/Ma. This slowing down tendency reflects the gradual decay of the intensive uplift at the boundary time of the Early and Middle Jurassic. The zircon and apatite fission-track age pairs show the exhumation rate is normally less than 55 m/Ma since the Middle Jurassic. Meanwhile, the rock exhumation rate is basically at the same quantity grade as that of its uplift rate, implying that its exhumation and uplifting were in equilibrium on the whole.

Key words: east segment of the eastern Kunlun; Mesozoic; uplift and exhumation; zircon and apatite fission-track chronology.

喜马拉雅造山带中段深成相和超浅成相超镁铁岩的发现及意义

李德威, 廖群安, 张雄华, 易顺华, 曹树钊

(中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074)

青藏高原众多的蛇绿岩带中出露大量的超镁铁岩, 这与特提斯的形成和演化密切相关. 然而在长达 2 000 km 的喜马拉雅造山带内部没有超镁铁岩的报道, 也没有找到新生代的火山岩. 最近我们通过 1: 25 万定结幅、陈塘区幅(国内部分)区域地质调查, 首次在喜马拉雅造山带中段定结一定日一带发现晚新生代不同类型的超镁铁岩, 主要是深成相的尖晶石橄榄方辉岩、尖晶石橄榄二辉岩和超浅成相的苦橄玄武岩、玻基辉橄岩, 常与高压基性麻粒岩伴生. 它们是喜马拉雅和青藏高原软流圈及岩石圈的结构和热状态、壳幔相互作用的一个窗口.

深成相和超浅成相的超镁铁岩主要产于喜马拉雅造山带核部的变质杂岩中, 区域上超镁铁岩沿着伸展性和走滑式的剪切带或断层带分布, 围岩以片麻岩、石英片岩、石英岩、大理岩为主, 在特提斯喜马拉雅沉积岩系中也见到超浅成相超镁铁岩.

尖晶石橄榄方辉岩、尖晶石橄榄二辉岩以大小不等的透镜体或脉状体的形式产出, 具有不同程度的角闪石化和应变局部化. 在强应变带, 橄榄石定向

排列; 颗粒细粒化, 出现亚颗粒和新生颗粒; 扭折带发育. 在弱变形岩石中, 斜方辉石呈粗大的柱状自形晶, 颗粒之间充填细粒的橄榄石和被角闪石交代的单斜辉石, 显示变余堆晶结构, 原岩可能为超镁铁质堆晶岩. 通过 SHRIMP 测得尖晶石橄榄方辉岩中锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄平均值为(16.71±0.54) Ma, 这个年龄与其伴生的高压基性麻粒岩中的一组为(17.6±0.3) Ma 的锆石²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄值接近, 表明超镁铁岩岩体的形成与喜马拉雅造山带的构造隆升及其相关的伸展拆离作用、淡色花岗岩侵位同时, 并与该区晚新生代壳幔反应和圈层耦合密切相关.

苦橄玄武岩和玻基辉橄岩沿着活动断层带呈岩筒状产出. 灰黑色的苦橄玄武岩具有特殊的岩相学特征, 在光学显微镜下可见其典型的鬃刺结构, 橄榄石斑晶局部集中, 其间为玻璃质充填, 发育气孔构造, 是地幔高度部分熔融的结果. 深灰色、暗紫色玻基辉橄岩具斑状结构, 橄榄石和辉石斑晶含量为 15%~20%, 基质为玻璃质或玻基交织, 含有辉石和斜长石微晶. 许多玻基辉橄岩呈角砾状, 角砾大小不等, 呈棱角状和次棱角状, 可拼性较好, 可能是隐爆角砾岩. 苦橄玄武岩和玻基辉橄岩与尖晶石橄榄方

(下转 694 页)