

对青藏高原隆升研究的几点思考

蔡雄飞, 顾延生, 吴丽云

中国地质大学 生物地质与环境地质教育部重点实验室, 武汉 430074;
中国地质大学 地球科学学院, 武汉 430074

摘 要: 青藏高原的隆升机制和隆升历史, 需多学科参与。其研究思想和研究方法有几点值得思考: ①磨拉石与高原(地面)隆升有没有必然的关系; ②生物尤其是古植物对青藏高原隆升最具灵敏性, 能够指示青藏高原多阶段隆升的一系列信息, 应该是今后研究的重点; ③不可忽视加大对高原腹地的沉积盆地研究; ④多学科的相互交叉、相互渗透已成为研究青藏高原隆升的必然趋势, 并以青藏高原北缘新生代生物、沉积学、岩石学成果为例。这些研究不仅可以极大丰富青藏高原隆升的内容, 而且可以相互验证, 提供更多相关联的直接证据。

关 键 词: 青藏高原; 几点思考; 新生代

中图分类号: P542⁺.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)02-0152-08

New Considerations in Studies on Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau

CAI Xiong-fei, GU Yan-sheng, WU Li-yun

1. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China; 2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Studies on uplift and uplift history of the Qinghai-Tibet Plateau demand multidisciplinary participations. The uplift mechanism of the Plateau, a long time debate, is interested by geologists all over the world. According to the recent field geological survey of the authors, we present here some considerations on studying methods and ideas of the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. First, whether or not molasse deposition has certain relationship with the plateau (surface) uplift. Second, biological records, especially palaeobotany, are sensitive to the plateau (surface) uplift, are credible indicators for a series of multi-phased uplifts of the Tibet plateau. Third, intercross of multi-subjects researching is needed to disclose the complete uplift history of the Qinghai-Tibet Plateau in Cenozoic era. Fourth, more emphasis should be given in studying the hinterland sedimentary basin of the Plateau.

Key words: Qinghai-Tibet Plateau; considerations; Cenozoic

青藏高原隆升是现今地学界最热门的研究课题之一, 相关成果非常丰富。其中高原隆升机制和隆升历史一直是高原隆升研究中的两大主题。在隆升机制方面, 经历了启蒙、奠基、大发展到深化研究几个阶段。近年来特别强调了高原隆升的分块断性、多阶段性、多因素特点, 并提出高原深部动力作用在高原隆升过程中的重要地位。

近几年的研究表明, 横穿青藏高原断面, 各块断的壳幔结构、厚度以及热状态各不相同。李庭栋^[1]

等将高原隆升分为 3 个不同动力机制的阶段, 即 K₂-E₂ 的碰撞挤压缓慢隆升阶段、E₃-N 的陆内汇聚热动力中速隆升阶段和 Q 以来的均衡调整热动力快速隆升阶段。东喜马拉雅构造结的矿物裂变径迹研究表明, 高原经历了 4 个不等速和非均变的隆升过程, 并先后受挤压缩短、侧向东逸、重力失稳等多种因素的联合控制^[2]。武红岭^[3]等用二维粘弹性有限元数值法模拟和反演了高原形成过程和各地体岩石力学参数, 阐明了高原隆升受多种因素控制, 其中

收稿日期: 2010-11-11 收到, 2011-04-27 改回

基金项目: 国土资源部“国家青藏专项”资助项目 (1212010610103; 1212011121261)

第一作者简介: 蔡雄飞 (1952—), 男, 副研究员, 从事地层和沉积学研究. E-mail: caixiongfei1952@163.com.

各岩石圈层力学性质的不均一性是基本控制因素之一。孔祥儒^[4]等通过对西藏西部综合地球物理剖面与岩石圈结构研究,提出高原深部构造是由不同特性的多个块体组成,故“其形成是多阶段、多形式、多机制、多块体的地球动力学构造演化过程的结果”。吕庆田^[5]等根据高原天然地震震源参数和地震波各向异性资料,强调了不同圈层构造机制上的差异性,即高原地壳的变形以周边逆冲叠覆和内部东西向拉伸走滑为主,中、下地壳和上地幔则以北东向的塑性流动为主,藏南上地幔盖层则以正断层脆性变形为主。Spencer^[6]等通过对大喜马拉雅 Kaghan 地区的构造样式研究,提出了“垮塌褶皱模式”,认为现今隆起的高原受热变底侵、重力均衡、垮塌拉伸、褶皱抬升等多种因素共同制约。高原隆升的沉积响应变形研究亦表明强烈的构造逆冲与拆离拉伸等多种作用共同控制着高原的隆升。另外,Chen^[7]等通过对柴达木盆地的研究,认为两个或多个巨型逆冲系统的“串联”作用加上地幔底辟作用完全可以把地面海拔提高上千米,并把这一假想的隆升机制应用于青藏高原的初生阶段。以上研究均说明高原隆升的分块断性、多阶段性和多种因素控制性的特点^[8,9]。

九十年代以来,主喜马拉雅深部逆冲带(MHT)藏南拆离系(STDS)最受人瞩目^[10],高原深部动力作用在高原隆升中占重要地位,并逐步突破板块构造学说的理论框架。中美两国科学家执行的 INDEPTH 项目收集制作的 CMP 和广角深部地震反射资料表明,在喜马拉雅壳幔中发育一条巨型向北下冲的陆内俯冲带,印度大陆地壳整体(或者是下地壳)沿此俯冲带向北俯冲到陆棚区北部的喜马拉雅地壳之下,它严格地控制着上、下地壳的变形活动;其上盘的抬升导致了地形大幅隆起。Hauck^[11]等通过 INDEPTH 项目发现 STDS 沿造山带延伸达 2000 km 以上,并伸入 27 km 的地下深处,MHT 则为北倾 8°,厚 60~80 m 的流体剪切带,同时 STDS 与 MHT 在地下深部呈汇聚趋势,相隔最近处距离 9 km,交角为 11°,但在更深处是否相交却不得而知。许志琴^[12]等通过天然地震岩石圈探测提出在高原深部很可能存在地幔热。

综上所述,青藏高原地球科学研究发生重大转移,即从搞清是什么转为探讨为什么并且呈现多学科紧密结合的特点。高原隆升从时间上看有早期隆升和晚期隆升,从始新世到上新世,甚至是更新世。就空间而言,有整体同时隆升和各个不同块体分别隆升^[13]。因而,高原隆升是所有研究学者非常关注而又长期遭受争议的问题之一。其研究思想和研究

方法有几点值得思考。

1 思考之一:磨拉石与高原隆升的关系

磨拉石一词出自瑞士^[14]用来描述发育在阿尔卑斯造山带前缘的一种碎屑沉积,是地槽发展后期粗碎屑岩的产物,是碰撞造山带的重要组成部分。不少人把 45~23 Ma 的各时代造山后期磨拉石堆积的砾岩作为标志,但磨拉石与高原隆升没有必然的关系。因为每次造山作用抬升,并不等于隆升。

剥蚀速率与隆升作用紧密相关。当剥蚀速率大于或等于沉积速率,地面不会发生隆升;只有当剥蚀速率小于沉积速率,地面才会发生隆升。因此,各时期的造山作用与盆地相互关系是一种盆山耦合的关系,即高处剥蚀、低处充填,与地面隆升没有必然的联系。但地面隆升是高原隆升与剥蚀的差,换句话说,高原隆升受造山作用抬升速率和剥蚀速率制约。

以青藏高原隆升的北缘关键地区昆仑山为例,虽然在晚三叠世印支运动已抬升成陆,长期一直处于风化剥蚀状态,这从盆山耦合可以佐证。东昆仑中段今出露的基岩最新地层是晚三叠世八宝山组的磨拉石堆积,晚三叠世之后至古近纪之前未接受沉积。侏罗纪时期,仅局部地区接受沉积,昆仑山是当时的物源供给区。从昆仑山口下侏罗统羊曲组组分看(表 1),羊曲组早、中期石英含量低、粘土含量高,晚期石英含量高,还出现粗碎屑含隧石、变砂岩、石英等组分,反映了中、晚期构造比较活跃,源区物质成分比较复杂,显示源区进一步抬升。

从碎屑组分看(表 1)其来源比较复杂,除石英、长石组分外,还有黑云母、隧石、安山岩、灰岩、绢云母、炭质、粘土等。这些源区碎屑矿物组分,显然与下伏的浅变质岩有关。下伏的浅变质岩既有巴颜喀拉山群,又有马尔争组。这些碎屑组分显然与附近的巴颜喀拉山群组分无关。因为附近的巴颜喀拉山群内部无黑云母、隧石、安山岩、灰岩、炭质等成分,而与马尔争组内部各种组分密切相关。马尔争组内部可划分出碎屑岩组合、玄武岩组合以及碳酸盐岩组合等。白垩纪在昆南可可西里盆地未出露,仅在昆北柴达木盆地的北缘少量出露,该时期沉积盆地与昆仑山的相关性知之甚少。古、始新统沱沱河组作为古近纪盆地发展的早期,其粗碎屑岩组合以变砂岩、石英岩、花岗岩、绢云母板岩以及凝灰岩、长石和灰岩等为主,表明其物质来源不仅仅来自于三叠纪浅变质岩地层,还有三叠纪以前的碳酸盐岩地层、甚至中元古界万保沟群的地层(表 2)。从风化作用

表 1 下侏罗统羊曲组组分表
Table 1 Compositions the Tangqu Formation of Lower Jurassic series w_B (%)

样品号	砾石组分		碎屑组分											基质组分					
	隧石	石英	钾长石	正长石	斜长石	白云母	黑云母	隧石	炭质	安山岩	粘土	灰岩	绢云母	绢云母	钙质	白云母	石英	褐铁矿	泥质
Bp34-1-1		40			2		1	5						3	2				
Bp34-1-2		10		2	2	2								3		7			
Bp34-2		70			3			7									7	10	
Bp34-3-1		75			4			8		1									
Bp34-4-2		50				43	2		5										
Bp34-5-1		65		3	2			8						3	12		5		
Bp34-6-1		36	2					2						2	3				
Bp34-8-1		65													30				5
Bp34-9-1	3	12									65			4					16
Bp34-10-1		75			2			1	5		2			5					10
Bp34-11-1		80				2			5		3			10					
Bp34-12-1		75		6	3				7					2	5	5			
Bp34-12-2		90									5								
Bp34-14-1		78				2					5			5	10				

表 2 沱沱河组碎屑组分表
Table 2 Compositions of the Tuotuohe formation w_B (%)

样品号	砾石组分						砂屑组分										基质组分					
	长石	砂岩	石英	凝灰岩	花岗岩	绢板	灰岩	石英	凝灰岩	透闪石大理岩	砂屑	绢板岩	长石	泥质	隧石	灰岩	岩屑	泥岩屑	灰岩屑	泥质	钙质	绢云母
KP10-20-1	3	9	3				5	5	40		5		20								11	2
KP10-17-2		6	2				2	5			30	3	5	40						1	40	
KP10-16-1													5			40	35	15				
KP10-12-1		3						8	35		35		2			2						
KP10-10-1			2	1			2	50	10	5	10		10								10	
KP10-9-1		10	3				5	37	5	10	5		5		5						15	
KP10-7-3			3		1	1		72	5		10		3								5	
KP10-5-1								60	4	3		8	10									
KP10-4-1	5			2	10	6	2	55				5	5		5						5	
KP10-3-1		35	15	5			20	5						6		4				2	3	
KP10-2-2		10	3		10	7		30	8			10	5	7								

看,以物理风化为主。沱沱河组大量的粗碎屑岩砾石和碳酸盐岩砾石是就近取材、迅速被搬运的产物。碎屑组分含有大量的透闪石大理岩,因而在可可西里盆地的发展早期,其物源是多样化的。反映昆仑山在当时一直处于风化剥蚀状态,抬升的高度大幅降低,因而物质来源组分比较混杂。昆南的可可西里盆地渐新统雅西措组第一段陆源粗、细碎屑岩组分主要来自于其下伏基岩上巴颜喀拉山亚群,以低长石含量和高石英、砂、泥碎屑岩为主,少量凝灰岩、安山岩、石英片岩等。这说明当时的物源供给以巴颜喀拉山为主,而昆仑山很少参与。位于昆仑山北缘的柴达木盆地和昆仑山南缘的可可西里盆地,两地的渐新统组分几乎相似,反映昆北柴达木盆地与昆南可可西里盆地当时连为一体,主要为开阔的湖

相沉积。至中新世早期,昆南可可西里盆地与昆北柴达木盆地仍完全连为一体,以相同的生物群和相同的岩性组合为特征。

生物化石方面也佐证了渐新世—中新世时期青藏高原北部没出现隆升,近几年在东昆仑中部中、上元古代和下古生界地层分布区,陆续发现大量古近纪和新近纪孢粉化石,古近纪孢粉化石组合与渐新世面貌相同^[15,16],表明古近纪渐新世初期昆仑山一直处于水下,不断接受大量沉积,直到中新世以后才开始隆升。因而昆仑山在印支运动已经抬升,但长期以来一直处于风化剥蚀状态,从渐新世以来至中新世中期不断下降。因此,地史各时期造山作用的磨拉石与地面隆升没有必然的因果关系。如果把磨拉石作为高原隆升标志,那么青藏高原的磨拉石一

直可延伸到十几亿年前。

把磨拉石作为高原隆升的标志,虽然具有一定的醒目标志,但它仅仅在局部条件下才能代表地面隆升,极大部分条件下并不是高原隆升的标志。

2 思考之二:古植物是指示高原隆升的标志

生物与环境紧密相连,相互作用、相互制约。每种生物对生存的环境都有一定的要求,过多或不足都可能使其生命活动受到抑制,乃至死亡。因此,生物的分异度不但与纬度、温度有关,而且与湿度、海水或湖水的深度、地形的海拔高度有关。这种敏感性,使得生物成为化石和古气候的良好标志,尤其是古植物受气候的影响比动物更明显。海拔高度不同会引起温度、降水、大气成分等差异,导致气候、土壤以及生物分布的垂直分带性。在高原山区,植物的垂直分带十分显著,从下往上,由热带植物群逐渐变为寒冷植物群。已故著名植物学家徐仁曾应用高山栎化石研究青藏高原隆升历史。他在西藏聂拉木县希夏邦马峰北坡海拔近 6000 m 地带发现在上新世中、晚期的砂岩层有一个高山栎化石层,内部由高山栎、类似黄背栎、灰背栎和其他种类的叶化石组成。高山栎是一种分布在喜马拉雅山区和我国西南湿润地带的常绿乔木,多生长在海拔 2200 ~ 3600 m,由此推测青藏高原在上新世中、晚期青藏高原隆升到 3000 m 左右。因而利用动、植物指示气候环境变化,不仅对动、植物演化提供了最直接的证据,而且为认识地史时期的高原隆升提供了非常直观的标志^[17]。

同样作为古植物记录的孢粉、植硅体,也可以指示古植物生态环境、古气候以及恢复古地理的面貌。如在低山丘陵地带生长着常绿、阔叶、落叶的植被,热带-亚热带植被以木兰、山龙眼、冬青等属为代表,

沙漠草原的植被以麻黄、藜属为代表,高寒环境的高山植被以雪松、铁杉、冷杉属为代表。

古植物记录的孢粉和植硅体研究表明,青藏高原首次寒冷的孢粉和植硅体都集中在中新世。青藏高原中部腹地温泉地区孢粉组合不仅具有明确的地质时代意义还指示了青藏高原隆升的古气候意义。自古新世至早、中新世,古植被由早期的针阔叶混交林、森林草原植被向晚期的疏林草原植被演化,古气候也由亚热带暖湿气候向温凉气候转变。这些疏林草原植被的出现指示了青藏高原的隆升^[18,19]。

青藏高原南部腹地也有相同的结果^[18]。中新世晚期孢粉组合以落叶阔叶树种的桦科、山毛榉科为优势树种,裸子植物以具囊松柏类较发育,出现的种类有双束松属、单束松属、落叶松属、冷杉、云杉等,草本植物见有菊科、藜科等,反映当时的植被类型为干旱且温凉的针叶与落叶阔叶混交林,伴有常绿阔叶植物,林下阴湿环境生长有石松属、水龙骨属,在高山植被灌丛带分布有蒿属、藜科的耐高寒属种。

现代疏林草原植被都分布在近 2~5 km 高程上,其中菊科、藜科和石松属、水龙骨属等也都分布在 2~5.5 km 的高原上。中新世这些草原植被孢粉的出现,可指示青藏高原已隆升到一定高度^[19]。

青藏高原北部腹地可可西里盆地植硅体记录也是相同的。在雅西措组和五道梁组的底部发现了较为丰富的植硅体化石,其中渐新世雅西措组中、上部植硅体主要来源于禾本科植物,少数为莎草科,另外还见蕨类、裸子植物和阔叶类植硅体,植硅体组合以温暖类型为主,而中新世五道梁组底部植硅体中裸子植物类型含量增高,草本类植硅体类型单一,以齿型、平滑棒型、突起棒型、扇型植硅体为主,植硅体组合以温凉为主(表 3),反映中新世以来古气候的降温事件^[20]。

表 3 雅西措组、五道梁组底部植硅体组合特征

Table 3 Assmlages of feature of the Phytolith, Yaxicuo and Wudaoliang Formation under

样号	方	长方型	扇型	哑铃型	短鞍型	长鞍型	齿型	平滑棒型	刺边棒型	长尖型	多面体型	三棱柱型	球型	薄板型	突起棒型	石屑	导管型	网脊块状	硅藻	温暖指数
KP23-15-1	5							5										5		0.50
KP23-13-3	10										5			5				80		1.00
KP23-13-2	5	5	8		5			5										10	5	0.82
KP23-12-1	15	15																10		1.00
KP23-10-1	20	15	10	5		5		5			10	5		10	10	20	5	20	5	0.92
BP33-1-4	型 5	10	5				3	5	3			3	2	15		40		20		0.65
BP33-1-1		5						20		5	20	2		30	5	40		20		0.17
BP33-1-2		3								5	5	18								
BP33-1-3										5	6	16				35		24		

注:KP23-10-1 中硅藻为盘星藻, KP23-13-2 中硅藻为羽纹藻

古植物能够指示青藏高原多阶段隆升的一系列信息,是今后研究的重点,尤其注重孢粉和植硅体的研究,但仅仅依靠残存的植物碎块或者果实对孢粉和植硅体化石的鉴定缺乏系统性和全面性。诸如花粉和种子等具有生殖功能的形态特征,在地质历史中由于进化会发生变化。因此需要结合动物化石,尤其是脊椎动物化石研究,以此推断青藏高原的隆升。如前述中新世孢粉和植硅体都为寒冷型植物,而从脊椎动物群尤其是哺乳动物群研究表明古新世—始新世基本属于一个动物地理区系,地形一片平坦。至中新世哺乳动物群发生明显的分化,我国大西北地区出现了草原型动物^[20]。因此,将植物和动物结合起来是研究高原隆升不可缺少的重要环节。

3 思考之三:加大对高原腹地沉积盆地的沉积物研究

青藏高原形成过程中,其周边及内部地区均形成了巨大的沉积盆地,其接受的沉积物量也是巨大的,如印度河扇和孟加拉扇两大盆地的沉积物体积相当于两个半喜马拉雅。这些盆地的沉积物是记录高原隆升历史忠实的档案,因此从沉积学角度把高原的隆升及其周边和内部盆地的沉积记录统一进行研究,是精确刻划青藏高原隆升历史直观、系统的方法。然而该项研究却滞后于其它学科领域对高原隆升的研究,即使偶尔重现高原隆升的沉积响应,也多从周边盆地入手。由于受恶劣自然条件限制,对高原内部盆地的研究更少。

青藏高原内部的沉积盆地与青藏高原在空间上相互依存,在物质上相互转化。盆地的沉积物是连接盆地与造山带的“纽带”,通过盆地沉积物源分析,可以有效地恢复蚀源区构造面貌、岩石组成、基底和盖层剥露过程、古流向以及示踪山盆系统间的物质交换过程。

盆地的粗碎屑岩系中的砾石最能够直接反映母岩的性质,也可反映破坏、磨蚀的程度和风化剥蚀作用的方式。因而其成分与母岩区的岩石类型、风化作用方式息息相关。

盆地的细碎屑岩系虽然受搬运和磨蚀的影响更大,其中碎屑成分比母岩少得多,但仍然可以反映与母岩区的相关性。如细碎屑岩中含有石英、长石成分,说明附近有杂砂岩源;再如石英含量高,常形成石英细砂岩,一方面反映了基底母岩含有石英质,另一方面也反映母岩区以化学风化作用为主。石英最稳定,因而在长期或强的化学风化条件下得以保存。

盆地各种碎屑岩系最能反映基底母岩成分,是

青藏高原隆升研究不可缺少的两个方面,空间上相互依存、物质上相互转换、地表形态上相互调整、均衡,两者具有耦合关系。把高原隆升与内部沉积响应连为一体,把造山过程与盆地演化之间形成统一的运动学过程和动力学机制,以相互作用的动态过程揭示高原隆升的特点,是高原隆升不可缺少的重要研究部分。

4 思考之四:系统性、综合性研究应当是今后重点

青藏高原隆升关系到全球气候和环境,仅靠单学科研究是不能解决根本性问题的。尤其是对隆升的时代研究,多年来差异较大。从事前第四纪研究的地质工作者,往往考虑古近纪和新近纪比较多。从事第四纪研究人员非常强调上新统或更新世以来高原隆升。而把古近纪、新近纪和第四纪结合起来进行系统研究还不多见。

1885年 Neumayr 拉开对青藏高原研究的序幕。上个世纪70年代,地学工作者从古生物学、岩石学、构造地质学、第四纪地貌学等角度研究,得到大批优秀的研究成果,但综合研究或者多学科联合作战尚不多见。从20世纪末期以来,中国地调局集中全国地调的精兵强将,对青藏高原进行了多学科的调查,取得了大量新的多学科的综合性认识,弥补了单学科的缺陷。2003~2005年,中国地质大学(武汉)在可可西里古近纪-中新世生物地层学、沉积学、岩石学研究中发现了中新世青藏高原隆升的信息。

可可西里古近纪-中新世的地层出露较好,剖面也比较连续,年代地层比较清晰。成都理工大学刘志飞等^[21~23]对原风火山群地层进行了详细、系统的地质学、沉积学和磁性地层研究,认为风火山群下部的沱沱河组粗碎屑岩系年龄为5.60~32 Ma,风火山群上部的细碎屑岩系夹石膏层的雅西措组年龄为32~30 Ma,五道梁组23 Ma。查保马组依据 SHRIMPU-Pb 年龄 18.28 ± 0.27 Ma 和 13.09 ± 0.57 Ma,次火山岩的 LA-ICP-MS U-Pb 年龄值为 17.67 ± 0.38 Ma,为中新世。区内主要地层单位为古近系、新近系。自下而上可划分为古、始新统沱沱河组、渐新统雅西措组、渐新统-中新统五道梁组以及中新统查保马组。各个组岩性具有各自的标志。

可可西里陆相盆地出现3次湖相沉积,说明其盆地形成并不是经历一次构造旋回而形成的简单盆地。第一次构造旋回由沱沱河组组成,纵向上出现粗、细、粗旋回,代表盆地初形、扩展和萎缩。第二次

由雅西措组组成,纵向上出现粗、细和石膏层旋回,也代表盆地初形、扩展和萎缩。其中雅西措组中部分布甚广,从盆缘至中心稳定分布。晚期石膏层的出现,是盆地开始萎缩的标志。第三次由五道梁组组成,纵向上也出现粗、细旋回,代表了盆地出现、扩展和萎缩。第四次由查保马组组成,为陆内火山喷发构造环境。因而可可西里盆地是一个经历多次构造旋回形成的复杂盆地,可将其沉积划分为隆升前和隆升后。

隆升前的沉积,从古近世到渐新世,可可西里岩性组合与内地相同,均含石膏的碎屑岩系沉积,古气候表现为炎热、干旱。隆升后的沉积,主要为中新世的五道梁组和查保马组。古气候表现为寒冷、温暖、潮湿、寒冷。古气候可用古植物的植硅体指示,即示暖型(方型、长方型、扇型、哑铃型、短鞍型、长鞍型)和示冷型(齿型、平滑棒型、刺边棒型、长尖型)颗粒含量的多少来指示气候的温暖程度^[24],即温暖指数=(示暖型植硅体总和)/(示暖型植硅体总和+示冷型植硅体总和)。

雅西措组植硅体以温暖类型为主,含丰富的蕨类、裸子植物和阔叶植物产植硅体,反映当时植被以森林为主,林下草本层较发育,温暖指数研究表明,雅西措组中、上部以及含石膏层温暖指数 0.92~1.00,也就是形成时期气候炎热,到雅西措组上部炎热环境达到了顶峰。雅西措组顶部出现一次降温过程,但尚未达到极端寒冷时期,植硅体尚未出现寒冷标志的形态,如尖型、刺型等。

五道梁组底部的 3 个样品,木本植物中裸子植物含量增高,类型单一,以齿型、平滑棒型、突起棒型、扇型、齿型、棒型植硅体为主。指示了一次极端的降温事件,温暖指数仅为 0.17,反映气候寒冷。因而从雅西措组到五道梁组,也就是古近纪渐新世—新近纪中新世本区出现了一次极端的降温事件(图 1)。

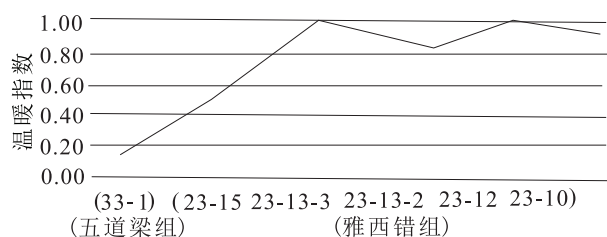


图 1 雅西措组、五道梁组底部古气候指数变化曲线

Fig. 1 Paleoclimatic index curve of the Yaxicuo formation and the low Wudaoliang Formation

在岩石学上以 Adakitc 岩大量出现为特征。中新统查保马组火山岩具有 Adakitc 岩的地球化学性质。其 $\text{SiO}_2 > 59.38\%$, LREE 强烈富集 ($> 466.47 \mu\text{g/g}$), 高 Sr ($> 949 \mu\text{g/g}$), 高 Sr/Y (> 53.66), 低 Y ($13.29 \sim 19.87 \mu\text{g/g}$, 平均值为 $17.12 \mu\text{g/g}$), 低 HREE (Yb $< 1.66 \mu\text{g/g}$), Eu 异常不明显,而 Nb、Ta 的负异常显著,这与正常弧火山岩有显著区别。火山岩高 SiO_2 说明它们是陆壳岩石在特定条件下部分熔融产生的壳源中酸性岩石系列。低 Y 和低 HREE 暗示了火山岩的源区物质在部分熔融时有石榴石矿物相的稳定存在。高 Sr 表明源区物质在部分熔融时有斜长石的熔融分解。Nb、Ta 的负异常暗示了火山岩的壳源岩浆应源于陆壳物质。反映了查保马组火山岩是高原隆升之后的火山岩盆地,其成因与地壳增厚和下地壳岩石部分熔融有关,提供了一种指示地壳加厚作用的标志。

由上可见,中新世早期可可西里已隆升一定高度,出现了寒冷的植硅体,但青藏高原北缘的昆仑山隆升还未达到一定的高度。表现为中新世下油砂山组、五道梁组广泛发育大量叠层石以及藻类化石。不同的是柴达木盆地中新世叠层石类型多样,有层状、穹状、丘状等,而可可西里盆地中新世五道梁组类型比较简单,主要为两种类型,一种呈层状,另一种为穹状。

中新世中、后期青藏高原北缘的昆仑山剧烈隆升,以可可西里查保马组 Adakitc 岩的出现为标志,表明青藏高原已经抬升到很高的高度,统一的湖盆格局被打破。昆仑山北缘的古地形进一步陡峻,导致昆仑山南缘柴达木盆地的上油砂山组底部以冲积扇为特征的粗碎屑岩砂砾岩层增厚。

关于中新世初期是青藏高原环境重大变化时期,也得到古植物和脊椎动物群尤其是哺乳动物群和构造古地理的佐证。从构造古地理看,青藏高原南缘 34~33 Ma 才结束海相沉积,由海变陆^[25],其海拔位于海平面。如果在其上覆地层中发育陆相地层,这二者转换的时间,便是高原发生隆升的时间。如 Ritts 等在塔里木东南一套新生代地层中发现了浮游有孔虫,确定该地区在 15 Ma 仍为海相,而该套地层现在位于海拔 1400 m,从而证明该地区快速隆升是发生在 15 Ma 之后^[26]。从微体生物的孢粉和植硅体都是寒冷植物群的组合,表明了青藏高原中新世有一次突然变冷的事件。而在之前,青藏高原内部并没有寒冷植物群的记录。

从岩石学看新近系中新统火山岩的岩石类型也比较发育,其岩石种类包括粗面玄武岩、玄武安山

岩、粗面安山岩、粗面岩,但以粗面安山岩和粗面岩居多,且粗面岩中往往发育两组近互垂直的节理。火山岩具典型的斑状结构,气孔、杏仁状构造。还发育许多在平面上呈圆筒状产出的次火山岩,次火山岩的岩石类型为玄武安山玢岩和粗面斑岩。次火山岩呈灰黑色,斑状结构,在次火山岩中发育大量的中-下地壳包体,如前所述尤其是中新统火山岩具 Adakitic 岩的地球化学性质。Adakitic 火山岩的性质和成分特征都指示了它们的岩浆源区大于 40 km,也指示了当时地壳的最小厚度超过 40 km,揭示青藏高原已经抬升到很高的高度^[27]。

因此,多学科的相互结合、相互渗透的研究方法,极大丰富青藏高原隆升研究的内容,提供更多隆升的标志和依据。

参考文献 (References):

- [1] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程机制[J]. 地球学报, 1995, (1): 1-9.
Li Tingdong. The uplifting process and mechanism of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1995, (1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [2] 钟大赉, 丁林. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26(4): 289-295.
Zhong Dalai, Ding Lin. The Tibetan plateau uplift process and its mechanism is discussed[J]. *Science In China (series D)*, 1996, 26(4): 289-295. (in Chinese with English abstract)
- [3] 武红岭, 王薇, 王连捷, 张利容, 崔军文. 青藏高原的隆升缩短及其弹性形变分析[J]. 地质力学学报, 1996, (2): 17-24.
Wu Hongling, Wang Wei, Wang Lianjie, Zhang Lirong, Cui Junwen. Uplifting and shortening of Tibetan Plateau and viscoelastic deformation analysis [J]. *Journal of Geomechanics*, 1996, 2(1): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [4] 孔祥儒, 王谦身, 熊绍柏. 西藏高原西部综合地球物理与岩石圈结构研究[J]. 中国科学(D辑), 1996, 26: 308-315.
Kong Xiangru, Wang Qianshen, Xiong Shaobo. Tibetan Plateau and the western geophysical structure of the lithosphere [J]. *China Science (series D)*, 1996, 26(4): 308-315. (in Chinese with English abstract)
- [5] 吕庆田, 姜枚, 马开义, 许志琴. 由震源机制和地震波各向异性探讨青藏高原岩石圈变形[J]. 地质评论, 1997, 43: 337-346.
Lü Qingtian, Jiang Mei, Ma Kaiyi, Xu Zhiqin. The deformation characteres of Qinghai-Xizang lithosphere: Implication from earthquake mechanism and seismic anisotropy [J]. *Geological Rev.*, 1997, 43(4): 337-346. (in Chinese with English abstract)
- [6] Spencer D A. Collapse folding as a mechanism of explaining the early ductile extension along the Indus suture and the subsequent exhumation of the Himalayan eclogites[R]. 11th Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop, 1996: 56-57.
- [7] Chen W P, Chen C Y, John L N. Active deformation of the Qai Dam Basin and its implications on the uplift of Tibet[R]. 11th Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop, 1996: 35-36.
- [8] 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 徐亚东, 骆满生, 向树元, 寇晓虎, 赵来时. 青藏高原古近纪-新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学, 2007, 32(5): 583-597.
Zhang Kexin, Wang Guocan, Chen Fenning, Xu Yadong, Luo Mansheng, Xiang Shuyuan, Kou Xiaohu, Zhao Laishi. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet Plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene [J]. *Earth Science*, 2007, 32(5): 583-597. (in Chinese with English abstract)
- [9] Zhang K X, Wang G C, Cao K, Liu C, Xiang S Y, Hong H L, Kou X H, Xu Y D, Chen F N, Meng Y N, Chen R M. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (series D)*, 2008, 51(11): 1658-1672.
- [10] Burchfiel B C, Chen Z L. The south Tibetan detachment system, Himalaya orogen: Extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt [J]. *The Geological Society of America (special paper)*, 1992: 269.
- [11] Hauck M L. An examination of Indepth-I data: Evidence for STDS continuation to 27 km depth and internal structure of the MHT [R]. 12th Himalaya-Karakorum-Tibet Workshop, 1997: 147-148.
- [12] 许志琴, 等. 青藏高原的深部构造物理作用: 地幔底辟及多向 1 陆内俯冲 [C]. 青藏高原动力学研究讨论会论文摘要, 1995: 10.
Xu Zhiqin, *et al.* Qinghai Tibet Plateau deep structure of physical function: Mantle diapirism and multi-directional subduction [C]. *Dynamics of Qinghai-Tibet Plateau Abstract Discussion*, 1995: 10. (in Chinese)
- [13] 王成善, 戴紧根, 刘志飞, 朱利东, 李亚林, 贾国东. 西藏高原与喜马拉雅的隆升历史和研究方法: 回顾与进展 [J]. 地学前缘, 2009, 16(3): 1-30.
Wang Chengshan, Dai Jingen, Liu Zhifei, Zhu Lidong, Li Yalin, Jia Guodong. The uplift history of the Tibetan Plateau and Himalaya and its study approaches and techniques: A review [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(3): 1-30. (in Chinese with English abstract)
- [14] Stanley R. Hart & Levent Gulen (Editor). Crust/Mantle recycling at convergence zones [M]. Kluwer Academic Publishers, 1987: 1-28.
- [15] 郭宪璞, 王乃文, 丁孝忠, 赵民, 王大宁. 东昆仑万保沟岩群古近纪孢粉化石的新发现 [J]. 地层学杂志, 2005, 29(增刊): 608-611.
Guo Xianpu, Wang Naiwen, Ding Xiaozhong, Zhao Min, Wang Daning. Discovery of the paleogene spore pollen from the Wanbaogou group-complex of eastern Kunlun [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2005, 29(suppl.): 608-611. (in Chinese with English abstract)
- [16] 郭宪璞, 王乃文, 丁孝忠, 赵民. 东昆仑造山带纳赤台岩群

- 基底地层发现中新世孢粉组合[J]. 地质论评, 2007, 53(6): 824—828.
- Guo Xianpu, Wang Naiwen, Ding Xiaozhong, Zhao Min. Discovery of Miocene spore pollen from matrix strata of the Naichitai Group-complex in the eastern Kunlun orogen belt [J]. Geological Review, 2007, 53(6): 824—828. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐仁. 大陆漂移与喜马拉雅山上升的古植物学证据[A]. 中国科学院青藏高原综合科学考察队. 青藏高原隆升的时代、幅度和形式问题[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 8—18.
- Xu Ren. Continental drift and the Himalayas rising palaeobotanical evidence[A]. Chinese Academy of Sciences, the Qinghai-Tibet Plateau comprehensive scientific expedition team. Times the uplift of the Qinghai-Tibet Plateau, magnitude and form[M]. Beijing: Science Press, 1981: 8—18. (in Chinese with English abstract)
- [18] 段志明, 李勇, 沈战武, 祝向平, 钟成全. 青藏高原腹地温泉地区新生代生态环境演化与高原表面隆升过程分析[J]. 中国地质, 2007, 34(4): 688—696.
- Duan Zhiming, Li Yong, Shen Zhanwu, Zhu Xiangping, Zhong Chengquan. Analysis of the evolution of the Cenozoic ecological environment and process of plateau surface uplift in the Wenquan area in the interior of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Geology in China, 2007, 34(4): 688—696. (in Chinese with English abstract)
- [19] Xu Y D, Zhang K X, Wang G C, Jiang S S, Chen F N, Xiang S Y, Guillaume D N, Hoorn C. Extended stratigraphy, palynology and depositional environments record the initiation of the Himalayan Gyirong Basin (Neogene China)[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, doi: 10. 1016/j. jseas. 2011. 04. 007.
- [20] 邱铸鼎, 李传夔. 中国哺乳动物区系的演变与青藏高原的抬升[J]. 中国科学(D辑), 2004, 24(9): 845—854.
- Qiu Zhuding, Li Zhuankui. Evolution of Chinese mammalian faunal regions and elevation of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. Science in China (series D), 2004, 34(9): 845—854. (in Chinese with English abstract)
- [21] 刘志飞, 王成善, 金韩, 伊海生, 郑洪波, 赵西西, 李亚林. 青藏高原沱沱河盆地渐新一中新世沉积环境分析[J]. 沉积学报, 2005, 23(2): 210—216.
- Liu Zhifei, Wang Chengshan, Jin Wei, Yi Haisheng, Zheng Hongbo, Zhao Xixi, Li Yalin. Qligo-Miocene deposition environment of the Tuotoohe basin central Tibetan Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2005, 23(2): 210—216. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘志飞, 王成善. 新生代全球变冷与青藏高原隆升的关系[J]. 矿物岩石, 1998, 18(增刊): 123—127.
- Liu Zhifei, Wang Chengshan. Relation between Cenozoic Global Cooling and Qinghai Tibet plateau uplift [J]. J. Mineal. Petrol., 1998, 18 (suppl.): 123—127. (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘志飞, 王成善, 伊海生, 刘顺. 可可西里盆地新生代沉积演化历史重建[J]. 地质学报, 2001, 75(2): 250—257.
- Liu Zhifei, Wang Chengshan, Yi Haisheng, Liu Shun. Reconstruction of depositional history of the Cenozoic Kekexil basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2001, 75(2): 250—257. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王永吉, 吕厚远. 植物硅酸体研究及应用[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 111—118.
- Wang Yongji, Lü Houyuan. Studing of phytolith and appling [M]. Beijing: Press of Marine, 1993: 111—118. (in Chinese)
- [25] 蔡雄飞, 刘德民, 魏启荣, 顾延生, 袁晏明, 李德威, 王国灿, 罗中杰. 古新世—中新世以来青藏高原北缘隆升的特征——来自可可西里盆地的报告[J]. 地质学报, 2008, 82(2): 194—203.
- Cai Xiongfei, Liu Demin, Wei Qirong, Gu Yansheng, Yuan Yanming, Li Dewei, Wang Guocan, Luo Zhongjie. Characteristics of north of tibetap plateau uplift at Paleocene-miocene-The evidence from Kekexili basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(2): 184—203. (in Chinese with English abstract)
- [26] Ritts B D, Yue Y J, Graham S A, Sobel E R, Abbink O A, Stockli D. From sea level to high elevation in 15 million years: Uplift history of the northern Tibetan Plateau margin in the Altun Shan [J]. American Journal of Science, 2008, 308(5): 657—678.
- [27] 魏启荣, 李德威, 王国灿, 郑建平. 青藏北部贡帽日玛正长斑岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年及其岩石地球化学研究[J]. 矿物岩石, 2007, 27(4): 45—52.
- Wei Qirong, Li Dewei, Wang Guocan, Zhen Jianping. SHRIMP U-Pb chronology and geochemistry of Cenozoic orthoclase porphyry in gongmaorima area, northern Tibet plateau [J]. Mineral Petrol., 2007, 27(4): 45—52. (in Chinese with English abstract)