

青藏高原的地质特征与形成演化

王振涛

中国地质科学院矿产资源研究所;国土资源部盐湖资源与环境重点实验室,北京 100037

摘要 青藏高原由于在全球所处的特殊地位,一直是各国科学家关注和竞争研究的热点地区,但仍有众多科学问题尚未达成一致。结合最新的研究进展,着重分析讨论青藏高原形成演化中的隆升过程及其地质学证据和动力学问题。青藏高原是一个独特的地质单元,有着条块相间的构造格局,地壳厚度巨大,其隆升已是不争的事实,在古生物学、沉积学、古地貌学、岩溶学和古地磁学等方面仍在积累大量证据,但对隆升过程的具体细节仍有不同认识。目前在探测地壳的精细结构方面取得了长足进展,对青藏高原下方俯冲的前沿位置、几何形态和运动方向等取得了相对统一的认识。

关键词 青藏高原;地质特征;形成演化;隆升

岩石圈结构、演化及动力学是当代国际地球科学的重要前沿领域。青藏高原处于冈瓦纳古大陆与欧亚大陆碰撞造山带的关键地带,是世界上最高、最新和最广阔的高原,被国际公认为当今岩石圈研究中的理想地区和大陆动力学研究的“野外实验室”,一直是各国科学家强烈关注和竞争研究的热点地区^[1-2]。虽然在国内外学者的共同努力下,对青藏高原的研究已经取得了重要的进展,但对印度—欧亚板块碰撞的时限、隆升阶段性与空间差异性、隆升动力机制、特提斯演化等重大事件和命题都存在分歧^[3-9]。本文主要从已有资料及

青藏高原地质特征入手,分析讨论青藏高原形成演化中有关其隆升的过程、地质学证据和动力学问题。对于青藏高原研究如日中天的今天,重新梳理、研判这些科学问题是十分必要的。

1 青藏高原的地质特征

1.1 独特的地质单元

青藏高原是地球上一个独特的自然地理单元(图1)^[10],重力异常形态^[11]显示其独成体系,现今仍保存着许多独具的

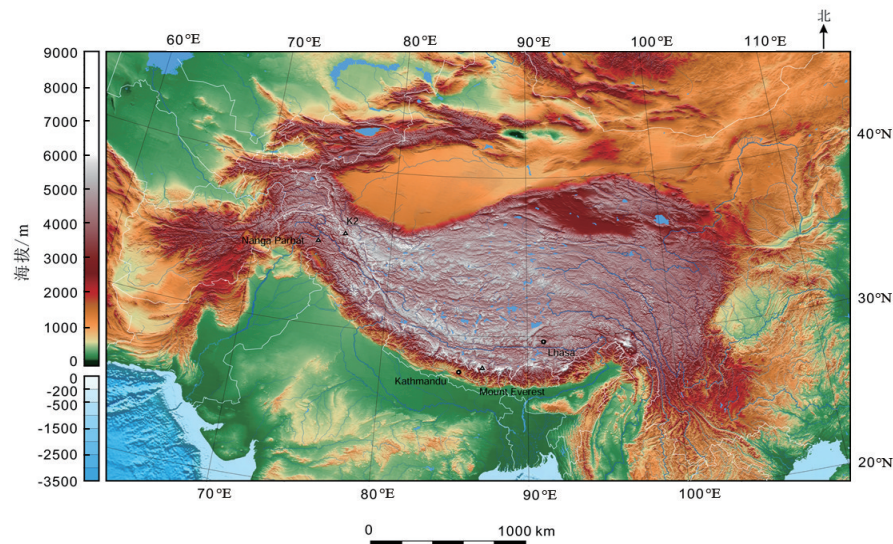


图1 青藏高原及其周缘地区地形^[10]

Fig. 1 Topographic map of Tibetan and surrounding areas

收稿日期:2016-11-10;修回日期:2016-12-25

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160054)

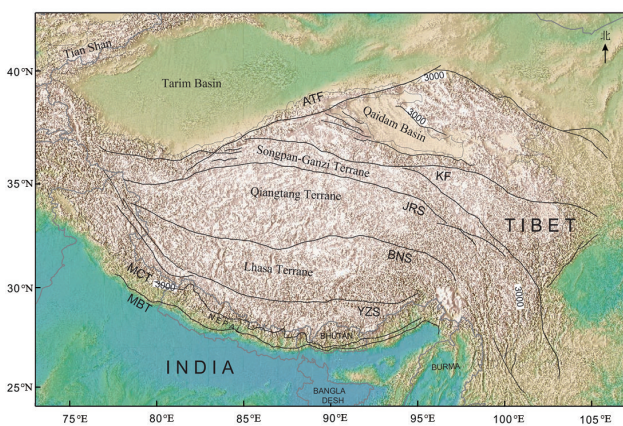
作者简介:王振涛,博士,研究方向为大地构造与沉积学、盐类矿床学,电子邮箱:wangz@cags.ac.cn

引用格式:王振涛. 青藏高原的地质特征与形成演化[J]. 科技导报, 2017, 35(6): 51-58; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.06.005

地质特征。青藏高原面积约 $250 \times 10^4 \text{ km}^2$,南北长1000 km,东西长2500 km,平均海拔在4500 m以上。总体地势呈西北高,东南低。高原周边切割强烈,造成巨大的地形反差,喜马拉雅山与南侧恒河平原高差可达6000 m,昆仑山与塔里木盆地间高差也达4000 m以上,高出河西走廊3500~4000 m^[12]。不仅如此,在高原上还耸立着许多巨大的山系与群峰,高原内陆水系和湖泊群广泛发育,是周围地区大多数河系的发源地。青藏高原不但规模大,而且它的高而平的景观称雄全球。正因为它特高的地势而被人们喻为“世界屋脊”、“地球第三极”,是地球独特的寒旱高极^[12]。青藏高原因其独特的自然地域格局和丰富的生态系统,被定义为国家生态安全屏障,为全球气候变化的预警区、敏感区^[13]。

1.2 条块相间的构造格局

青藏高原岩石圈结构无论在纵、横方向上都是不均匀的。研究青藏地区岩石圈构造,常以青藏古构造带的划分作为切入点。大量的地球物理和地质调查研究发现,青藏高原的主要构造特征表现为南北向的显著差异,有着条块相间的构造格局(图2)^[14],其内部部分地块以及边界的划分,不同学者可能有不同的认识,而且这些地块和边界(断裂、缝合带)的名称也会随之略有变化,但在总体格局上基本大同小异^[15-22]。另外,这些地块内部根据具体的研究目的可能会再细分为一些微地块^[23]。一般认为,青藏高原由5条窄长的缝合带和被它们分隔开的6个地体组合而成^[12],这些板块缝合带被认为是不同时代特提斯洋的闭合记录^[24]。截至目前,特提斯洋的命名与划分方案存在很大争议。一般认为,特提斯洋是中生代时期存在于劳亚大陆(北部)和冈瓦纳大陆(南部)之间、略呈近东西走向的宽阔大洋^[25]。在发育时间上,特提斯洋的发育与消亡北部早,南部晚,由北向南迁移,因此,高原各地体的拼接亦是北部早,南部晚,自早古生代依次向



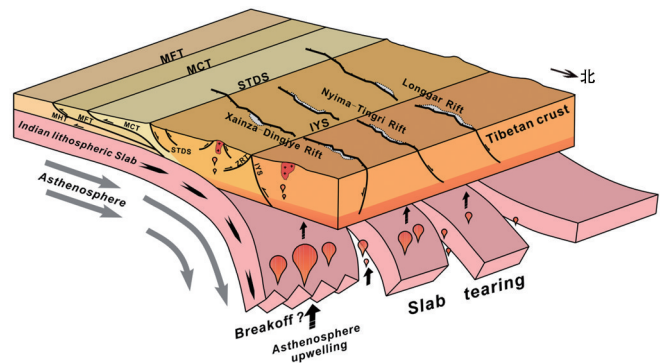
ATF—阿尔金断裂;BNS—班公错—怒江缝合带;JRS—金沙江缝合带;KF—昆仑断裂系;MBT—主边界逆冲断裂;MCT—主中央逆冲断裂;YZS—雅鲁藏布江缝合带

图2 青藏高原地形图及构造单元划分^[14]

Fig. 2 Topographic map of Tibetan and surrounding areas and related tectonic units

南迁移^[12]。但也有观点认为无论何时期,均不存在广阔、“干净”、宽达6000~7000 km的“特提斯洋”,而很可能是“多岛(陆)洋”^[5-9]。

相对青藏高原南北向的显著差异引起的广泛关注而言,对高原深部结构东西向差异的研究较少,后者在近些年才逐渐引起重视,并获得了不少新认识。例如,认识到印度岩石圈板片在青藏高原下方向北俯冲过程中,俯冲角度存在系统差异(东陡西缓),一方面造成了俯冲板片撕裂和板片断离,另一方面导致板片俯冲距离远近不同(东近西远),如图3所示^[26]。还发现印度大陆岩石圈所表现的地震波高速异常在班公湖—怒江缝合带以南以40°的高角度向北延伸^[27]。针对青藏高原中南部发育的大量东西向拉张构造,如班公怒江缝合带两侧的共轭走滑断层和藏南的南北向裂谷,研究显示青藏高原南部上地幔和高原上地壳一样存在东西向的拉张变形,但两者断层水平相距近百公里且没有直接连通,说明上地壳和上地幔的东西向拉张是弱耦合的^[28]。进一步研究发现,在89°E附近存在一个南北走向的显著低速异常,延伸深度超过300 km,穿过了俯冲的印度岩石圈,将藏南上地幔顶部的低速和藏北上地幔大范围的低速异常相互连通^[27]。印度大陆岩石圈在亚东—谷露裂谷西侧发生撕裂,引起软流圈物质上涌,并联通了高原南部和藏北的大范围低速区域^[27]。有理由相信,随着资料的积累,一些新的发现必将进一步拓宽和深化对青藏高原深部的认识。



MFT—主前缘冲断裂;MCT—主中央逆冲断裂;STDS—藏南折离系;ZRT—Zedong-Renbu逆冲断裂;IYS—印度—雅鲁藏布江缝合带
图3 印度岩石圈板片在青藏高原南部下方发生撕裂和断离的动力学模型^[26]

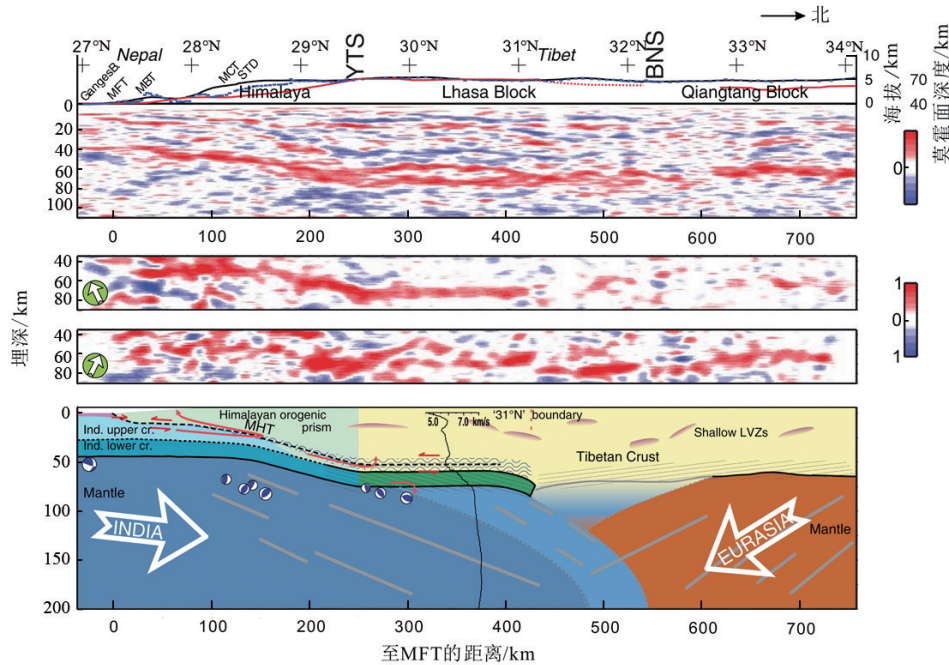
Fig. 3 Interpretation cartoon showing the slab tearing and/or breakoff model of the Indian lithosphere with differential subduction angles in the Himalayan-Tibetan collision zone

1.3 巨厚的地壳和多圈层的垂向结构

为探明深部地壳和岩石圈结构特征,在利用地震面波层析成像、人工源宽角反射/折射地震资料、大地电磁测深资料和被动源宽频带流动台阵资料研究与青藏高原有关的地壳、上地幔结构方面,已有海量的成果发表^[27, 29-30]。普遍认识到青藏高原平均地壳厚度较大(~70 km),大体上相当于正常大陆

地壳的2倍^[31]。同时,在高原内部,地壳厚度也并不一致,地壳不均匀性显著^[17]。在高原内部,厚地壳与高地势大体呈正相关关系,即地势高地壳厚;在高原周边,地形差异带也是地壳厚度与各种地球物理场的陡变带。整体上,高原具有巨

厚、多层、高低速相间的地壳结构(图4)^[32],并且中部厚,向南北两侧及周边减薄。莫霍面呈中部深、边缘浅、周边地区更浅的似盆状形态;在高原内部诸缝合带两侧,莫霍面多有断错^[33]。



Qiangtang Block—羌塘块体;Lhasa Block—拉萨块体;Himalaya—喜马拉雅;Nepal—尼泊尔;BNS—Bangonghu—班公湖—怒江缝合带;STD—藏南拆离系;MCT—主中冲断裂;MBT—主边界逆冲断裂;MFT—主前缘冲断裂

图4 横穿青藏高原地震层析剖面图^[32]

Fig. 4 Seismic topography profile across the Tibetan Plateau

2 青藏高原的隆升

2.1 研究现状

新生代以来,地球上最为显著的地貌变化就是青藏高原的隆升。就其隆升的时限而言,不同研究者取得的数据不尽一致,而且采用的方法、数据的可靠性和精确程度均不相同^[34]。由于研究对象定年的不确定性及绝对古高程的替代指标尚未能达成一致等原因^[35-36],目前仍是研究的难点问题。一直以来,青藏高原隆升在全球引起广泛关注,各种观点层出不穷,仅在国际著名的《Nature》和《Science》杂志上就发表了许多争论文章^[37-42]。而且,这方面的文献和专著还在快速积累中^[34,43]。值得注意的是,肖序常^[1]曾提出“青藏高原的隆升特征,时、空上是不均一的,是多层次、多阶段、多因素的”的认识。青藏高原的隆升及其过程要取得接近实际、较为确切的结果,必须多学科有机结合,综合分析研究,这不仅需要运用新技术、新方法提供定量数据,而且必须多学科结合与集成^[1]。

2.2 青藏高原隆升的地质学证据

2.2.1 古生物证据

自中国学者^[44]首次在希夏邦马峰北坡海拔5000 m以上

的上新世地层中发现高山栎化石以来,关于青藏高原在新近纪末期以来发生强烈上升的观点已在学术界深入人心。后来的重新研究表明从上新世以来希夏邦马峰地区上升了2200~3400 m,而中新世南木林乌龙组下段所代表的古海拔为2500~3000 m,上段所代表的古海拔为2800~3000 m,自中新世以来该地区至少抬升了1300 m^[45]。

李廷栋^[46]曾关注到青藏高原东部、南部始新世—渐新世沉积中发现的以棕榈科、榕属为主的植物群。高原中部、北部乃至更北的柴达木盆地均发现栎、松、杉、麻黄为主的孢粉组合以及杨、柳、旱梅等温带落叶阔叶植物群化石,以此推断当时海拔高度为500~1500 m。之后,新近纪时高原的高山栎类植物和部分地区孢粉组合等反映当时为草原—森林型植被面貌,海拔高度约2000~3000 m^[46]。雅鲁藏布蛇绿岩带和特提斯喜马拉雅带之间的山前磨拉石建造的上部层位找到了一批植物化石(柳区组植物群),形成时代为始新世中、晚期,推测柳区组当时与现今热带—亚热带雨林—季雨林分布区的年平均温度比较相近^[47],亦表明当时海拔还不是很低。

从青藏高原三趾马动物群(地质时代以上新世为主)的首次发现^[48]到从南至北多处发现^[49-50],说明当时青藏高原抬升

不局限于狭窄地带,而是具有较广阔抬升面的,推断当时高原海拔高度达1500~2500 m^[48-49]。

依据对西藏南木林盆地化石的叶相分析,推测青藏高原南部在15 Ma前就已经达到了目前的高度^[41]。特化等级裂腹鱼类的主要分支发生事件,与晚新生代青藏高原在8、3.6、2.5和1.7 Ma BP发生的地质构造事件以及气候重大转型时期基本吻合,不支持青藏高原在渐新世或中新世整体隆起已接近现在高度或更高的观点^[51]。近期,中国以及英国、奥地利、印度等国专家合作,首次发现、描述和报道了在藏北可可西里地区五道梁盆地(海拔4611±9) m)早中新世五道梁组地层发现的小槲叶化石^[52],估测藏北可可西里的古海拔在1395~2931 m之间,这意味着在过去的17 Ma中,该地区至少抬升了2000~3000 m。

2.2.2 沉积学证据

新生代以来高原出现了不同时期的陆相沉积,反映了高原的隆升过程^[5]。晚白垩世晚期—渐新世,沿雅鲁藏布江南、北出现山麓相堆积或山间盆地堆积(雅鲁藏布江磨拉石带),反映当时冈底斯带和雅鲁藏布蛇绿岩分布区已隆升为中低山区^[46]。与上述磨拉石沉积大体同时或稍后,雅鲁藏布江缝合带东段的罗布沙群,也是典型磨拉石相沉积,在加查—曲松—康金拉一带厚度非常大,多为分选不好的粗碎屑沉积,反映了经历过较强烈的抬升和较快的剥蚀作用;而同期的沉积在罗布沙和朱麦莎等地则为泥砂质、砂质为主的山间小湖盆沉积^[5]。以上特征说明,即使在同一地带、同一时期,地壳的隆升和剥蚀程度是不均一的^[5]。渐新世到中新世,除高原北部和东部出现以贡觉盆地为代表的山间盆地型红色碎屑岩建造外,高原内部大部分为河湖相细碎屑沉积及含煤、含油岩系,代表了温暖潮湿气候条件和较稳定的沉积环境;地势高差不大,东北部高,山脉海拔不超过2000~3000 m,其余地区低,山区海拔一般为500~1000 m,未出现典型的磨拉石相沉积^[46]。自上新世开始,高原内部大部分盆地消失,在高原南北边缘出现巨厚的上新世—早更新世乃至中更新世的磨拉石相沉积,标志着上新世—更新世时期青藏高原大幅度的抬升^[5,46]。

在青藏高原北缘的山前凹陷河西走廊内,晚新生代山麓相磨拉石酒泉砾石层和玉门砾岩呈角度不整合接触,对河西盆地老君庙背斜剖面开展的古地磁测年发现酒泉砾石层底部年龄为0.84 Ma BP,不整合面年龄为0.93~0.84 Ma BP,揭示青藏高原北部在这一时期发生了强烈新构造挤压隆升^[53]。在喜马拉雅东端埋藏在>500 m沉积层之下发现了雅鲁藏布江大峡谷,对原来河谷充填底部沉积的重建表明雅鲁藏布江峡谷坡度变陡是由于东喜马拉雅构造结自约2.5 Ma岩石加速隆升的结果^[54]。玉龙山东麓代表湿热环境的古红壤与寒温条件下形成的当地现代土壤的巨大的差异反映了青藏高原东南部500~700 ka以来有过大幅度的隆升,根据现代红壤发育条件保守估算,该时期以来此地区隆升的幅度超过800 m^[55]。

最近,通过对流经祁连山、北山河流碎屑锆石U-Pb年龄以及玉门盆地新生代沉积物中锆石U-Pb年龄的对比研究^[56],揭示24~16.7 Ma北山发生隆升,为玉门盆地提供物源,而在约16 Ma玉门盆地物源由北山转变为祁连山,揭示了祁连山此时开始快速隆升;中新世中期(16~10 Ma)构造变形与山脉快速隆升的相关证据广泛存在于青藏高原东北缘地区,譬如北祁连山于约13.5 Ma开始快速隆升^[57],揭示高原东北缘地区可能在中新世中期经历了整体性抬升与变形。

2.2.3 古地貌与岩溶证据

高原的急剧隆升,必然会引起山地面貌的变化。早在20世纪60年代就认识到青藏高原古地貌、岩溶及夷平面等是反映高原隆升的有力证据^[58]。由于一直缺少高原岩溶和夷平面等发育的确切时限,限制了对夷平面原始高度做深入的讨论,直到20世纪末才有了其年龄的明确报道^[59-60]。

对青藏高原唐古拉山及其邻区在上新世发育的第一期石墙为代表的岩溶地貌的研究^[61-62],发现上新世或稍前较广泛发育的岩溶地貌在高原南部尤为显著,而北部阿尔金—昆仑地带与之相比大为逊色,这意味着南北地带隆升的时空上是不均一的。其后,早更新世初期,高原经历了一次较剧烈的构造抬升,之后有一相对稳定的第二期夷平面(主夷平面),在谷坡上形成第二期以峰林为代表的岩溶地貌。用洞穴再结晶方解石测得的20个裂变径迹年代数据揭示,主夷平面形成时代是19~7 Ma BP^[59],该数据得到了相关沉积和热构造事件间歇时代等的验证^[60]。据此认为,青藏高原经过3次隆起和2次夷平,2次夷平后的高度均在500 m以下,目前意义上的青藏高原起自5 Ma BP的最新一次抬升,在早更新世高原达到第一临界高度1500 m,0.7 Ma BP又经过一次强烈的构造运动(昆黄运动)达到第二临界高度3000 m^[60]。

2.2.4 古地磁证据

肖序常和李廷栋^[5]根据早期的古地磁数据^[61-62]认为,各地体古近纪—新近纪向北位移量,从南向北越来越小,与深部地球物理资料大体一致:即冈底斯以北存在反映压缩量大的较厚岩石圈,而羌塘地体与柴达木地块之间出现负值。说明柴达木新生代以来,对南来的挤压很可能起到阻挡作用,并向羌塘地体北面下插。最近,通过古地磁研究证实15 Ma时印度—欧亚板块碰撞带由刚性板块运动转换为塑性地壳变形,从而导致青藏高原大规模快速隆升^[63]。通过对阿尔金山和昆仑山的系统古地磁测量发现,两座山脉在24~15 Ma发生板块旋转,而15 Ma以后板块旋转终止。这强有力地证明了经典刚性板块运动发生在15 Ma以前,15 Ma以后转换地壳均匀变形^[63]。古地磁作为约束青藏高原各地块构造演化的一个主要手段,其数据的不断积累必定进一步深化人们的认识。

3 青藏高原大陆动力学

青藏高原的壳幔结构与隆升机制构成当今青藏高原研

究的最前沿课题,长期以来已使其成为检验地球科学中多种理论、学说的经典地区^[6]。在印度板块和欧亚板块碰撞以来,青藏高原隆升所消耗的物质质量占不到高原缩短所产生的物质质量的一半,其余的物质到哪儿去了?是以什么方式消失的?青藏高原隆升机制研究中的一个关键问题就是要为这些剩余物质寻找合理的出路^[64]。为此,人们提出了多种假设。肖序常^[1]曾撰文介绍过,此处不再赘述。

目前,关于青藏高原构造隆升的地球动力学机制有两种流行观点值得关注,即下地壳流(Channel flow)模型^[65-66]和地壳挤压缩短变形模型^[67]。Zhao等^[68]认为青藏高原的地壳缩短在高原南部通过印度地壳向亚洲地壳之下俯冲实现调节,在高原北部为均匀的地壳增厚所吸收。直到Bai等^[64]在青藏高原东部发现两条中下地壳物质流,才为它们的横向东流以及对高原剩余物质的消耗作用的关注奠定了基础。譬如,现在开始关注到青藏高原东缘的高地形可能源于中央高原之下的深部地壳向高原边缘的流动。Zhang等^[69]认为岩石圈拆沉(delamination)或热的软流层逃逸流动带来的重力反弹,导致龙门山抬升,形成青藏高原周缘地形梯度最大的龙门山造山带。此外,还有个别新颖观点需要关注,例如Zhang等^[70]的“冰川侵蚀”新模式和Fu等^[71]的快速侵蚀所引起的地壳均衡反弹模式。

探测地壳的精细结构是解开造山带形成奥秘的基础,虽然现在对青藏高原下方俯冲的前沿位置、几何形态和运动方向等取得了相对统一的认识^[64,72],但对青藏高原隆升机制研究中岩石圈的变形方式仍存在不同看法。肖序常^[6]指出,印度大陆向欧亚大陆碰撞所产生的时空复杂效应等问题,单凭地球物理深探测仍感不足,因为它提供的图像仅反映现今(或新生代后期?)深部状况,较长的碰撞造山期(暂定为50~60 Ma开始)高原深部演化,显然是复杂多样的,今后需深化地球物理深探测,并与地质、地球化学多学科结合研究,以期获得较为接近客观实际的成果。

4 结论

1) 与具有简单、均一、稳定、冷的薄地壳(30~40 km)和刚性古老基底组成的世界上其他高原不同,青藏高原作为一个独特的地质单元,具有复杂、不均一、多地体拼贴和相对热的巨厚地壳。

2) 青藏高原隆升一直是国际学术界关注的科学问题,各种观点层出不穷,有着各方面的依据。高山栎、小檗叶等植物化石、孢粉组合、三趾马动物群和特化等级裂腹鱼类等揭示青藏高原不同地区不同时代经历了不同程度的抬升。磨拉石堆积及其沉积相分布、深部雅鲁藏布江大峡谷的发现和原来河谷底部沉积的重建、古红壤、山麓相磨拉石底部和河流碎屑锆石等沉积响应及其时限的精确确定,为青藏高原隆升的幅度和时限做了更加精确的刻画。高原古地貌、岩溶和夷平面等发育的确切时限在揭示高原隆升方面独树一帜。

在重塑青藏高原各地体的位移量方面,古地磁数据仍发挥着不可替代的作用。

3) 揭示青藏高原之秘,出路在其深部。目前对青藏高原下方俯冲的前沿位置、几何形态和运动方向等取得了相对统一的认识。在青藏高原构造隆升的地球动力学机制方面,目前有两个模型(下地壳流模型和地壳挤压缩短变形模型)影响较大,针对局部地区还提出了诸如“冰川侵蚀”、快速侵蚀所引起的地壳均衡反弹等新模式。

致谢:本文得到了中国科学院院士肖序常的悉心指导,在此谨表谢忱!

参考文献(References)

- [1] 肖序常. 开拓、创新,再创辉煌——浅议揭秘青藏高原之秘[J]. 地质通报, 2006, 25(1/2): 15-19.
Xiao Xuchang. Making innovation in a pioneering spirit and scoring more glorious achievements—A preliminary discussion on the 1:250000 regional geological mapping in the Qinghai Tibet Plateau[J]. Geological Bulletin of China, 2006, 25(1/2): 15-19.
- [2] 许志琴, 杨经绥, 侯增谦, 等. 青藏高原大陆动力学研究若干进展[J]. 中国地质, 2016, 43(1): 1-42.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Hou Zengqian, et al. The progress in the study of continental dynamics of the Tibetan Plateau[J]. Geology in China, 2016, 43(1): 1-42.
- [3] Hu Xiumian, Eduardo Garzanti, Ted Moore, et al. Direct stratigraphic dating of India-Asia collision onset at the Selandian (middle Paleocene, 59±1 Ma)[J]. Geology, 2015(43): 859-862.
- [4] Ding Lin, Muhammad Qasim, Ishtiaq A K Jadoon, et al. The India-Asia collision in north Pakistan: Insight from the U-Pb detrital zircon provenance of Cenozoic foreland basin. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 455: 49-61.
- [5] 肖序常, 李廷栋. 喜马拉雅岩石圈构造演化总论[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
Xiao Xuchang, Li Tingdong. Pandect of Himalayan lithosphere tectonic evolution[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1988.
- [6] 肖序常, 王军. 青藏高原构造演化及隆升的简要评述[J]. 地质论评, 1998, 44(4): 372-381.
Xiao Xuchang, Wang Jun. A brief review of tectonic evolution and uplift of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geological Review, 1998, 44(4): 372-381.
- [7] Xiao Xuchang, Wang Jun, Su Li, et al. An early aged ophiolite in the western Kunlun Mts, NW Tibet Plateau and its tectonic implications[J]. Acta Geologica Sinica (English Edition), 2005, 79(6): 778-786.
- [8] 肖序常. 青藏高原碰撞造山作用及效应有关研究成果评述[M]//肖序常. 青藏高原的碰撞造山作用及效应. 北京: 地质出版社, 2010: 537-565.
Xiao Xuchang. Concise review of the collision orogeny of the Qinghai-Tibetan Plateau and its effects[M]//Xiao Xuchang. Collision orogeny and its effect of Qinghai-Tibet Plateau. Beijing: Geological publishing house, 2010: 537-565.
- [9] Ahmad F. The myth of oceanic Tethys[J]. Bollettino della soeietta, Paleontologica Italiana, 1982, 21(2/3): 153-168.
- [10] Tibet and surrounding areas topographic map[EB/OL]. (2015-6-11).

- [2016- 10- 15]. https://commons.wikimedia.org/wikibuchon/File:Tibet_and_surrounding_areas_topographic_map_2.png.
- [11] 张燕, 程顺有, 赵炳坤, 等. 青藏高原构造结构特点: 新重力异常成果的启示[J]. 地球物理学报, 2013, 56(4): 1369-1380.
Zhang Yan, Cheng Shunyou, Zhao Bingkun, et al. The feature of tectonics in the Tibet Plateau from new regional gravity signals[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(4): 1369-1380.
- [12] 孙鸿烈, 郑度. 青藏高原形成演化与发展[M]. 广州: 广东科技出版社, 1998. 1-72.
Sun Honglie, Zheng Du. Formation, evolution and development of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau[M]. Guangzhou: Guangdong Science & Technology Press, 1998. 1-72.
- [13] 孙鸿烈, 郑度, 姚檀栋, 等. 青藏高原国家生态安全屏障保护与建设[J]. 地理学报, 2012, 67(1): 3-14.
Sun Honglie, Zheng Du, Yao Tandong, et al. Protection and Construction of the National Ecological Security Shelter Zone on Tibetan Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(1): 3-14.
- [14] Kind R, Yuan X, Saul J, et al. Seismic images of crust and upper mantle beneath Tibet: Evidence for Eurasian Plate subduction[J]. Science, 2002, 298(5596): 1219-1221.
- [15] 肖序常, 汤耀庆, 高延林. 再论青藏高原的板块构造[J]. 中国地质科学院院报, 1986, 3(14): 7-19.
Xiao Xuchang, Tang Yaoqing, Gao Yanlin. Reexposition on plate tectonics of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1986, 3(14): 7-19.
- [16] 肖序常, 李廷栋, 李光岑, 等. 青藏高原的构造演化[J]. 中国地质科学院院报, 1990, 1(20): 123-125.
Xiao Xuchang, Li Tingdong, Li Guangcen, et al. Tectonic evolution of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences, 1990, 1(20): 123-125.
- [17] 吴功建, 肖序常, 李廷栋. 揭示青藏高原的隆升—青藏高原东亚—格尔木地学断面[J]. 地球科学, 1996, 21(1): 34-40.
Wu Gongjian, Xiao Xuchang, Li Tingdong. Expose the uplift of Qinghai-Tibet Plateau: Yadong-Golmud geoscience transect in Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1996, 21(1): 34-40.
- [18] Harris N. The elevation history of the Tibetan Plateau and its implications for the Asian monsoon[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 241: 4-15.
- [19] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211-280.
- [20] Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions[J]. Journal of Geophysical Research, 2006, 111: 1-21.
- [21] Zhao J, Yuan X, Liu H, et al. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(25): 11229-11233.
- [22] Wei W, Xu J, Zhao D, et al. East Asia mantle tomography: New insight into plate subduction and intraplate volcanism[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2012, 60: 88-103.
- [23] Metcalfe I. Palaeozoic and Mesozoic tectonic evolution and palaeogeography of East Asian crustal fragments: The Korean Peninsula in context[J]. Gondwana Research, 2006, 9(1/2): 24-46.
- [24] Yin A, Harrison T M. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28: 211-280.
- [25] Scotese C R. A continental drift flipbook[J]. The Journal of Geology, 2004, 112(6): 729-741.
- [26] Chen Y, Li W, Yuan X, et al. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 413: 13-24.
- [27] Liang X, Chen Y, Tian X, et al. 3D imaging of subducting and fragmenting Indian continental lithosphere beneath southern and central Tibet using body-wave finite-frequency tomography[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, 443: 162-175.
- [28] Tian X, Chen Y, Tseng T, et al. Weakly coupled lithospheric extension in southern Tibet[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 430: 171-177.
- [29] Chen Y, Badal J, Hu J. Love and rayleigh wave tomography of the Qinghai-Tibet Plateau and surrounding areas[J]. Pure and Applied Geophysics, 2010, 167(10): 1171-1203.
- [30] 郑洪伟, 李廷栋, 高锐. 青藏高原地震层成像的研究进展[J]. 物探与化探, 2010, 35(2): 160-164.
Zheng Hongwei, Li Tingdong, Gao Rui. The progress of seismic tomography research in the Tibetan Plateau[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2010, 35(2): 160-164.
- [31] 李秋生, 彭苏萍, 高锐. 青藏高原莫霍面的研究进展[J]. 地质论评, 2004, 50(6): 598-612.
Li Qiusheng, Peng Suping, Gao Rui. A Review on the Moho Discontinuity beneath the Tibetan Plateau[J]. Geological Review, 2004, 50(6): 598-612.
- [32] Nabelek J, Hetenyi G, Vergne J, et al. Underplating in the Himalaya-Tibet collision zone revealed by the Hi-CLIMB Experiment[J]. Science, 2009, 325(5946): 1371-1374.
- [33] 郑度. 青藏高原形成演化与环境变化研究进展[J]. 中国基础科学, 2000(1): 10-14.
Zheng Du. Progress in studies on formation, evolution and environmental changes of the Tibetan Plateau[J]. China Basic Science, 2000(1): 10-14.
- [34] Sun J, Xu Q, Liu W, et al. Palynological evidence for the latest Oligocene-early Miocene paleoelevation estimate in the Lumpola Basin, central Tibet[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2014, 399: 21-30.
- [35] 张冉, 刘晓东, 安芷生. 青藏高原古高度重建方法研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(5): 129-136.
Zhang Ran, Liu Xiaodong, An Zhisheng. Research progress in methodology for paleoelevation reconstruction of the Tibetan Plateau[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2008, 28(5): 129-136.
- [36] 姜高磊, 张克信, 徐亚东. 青藏高原古高程定量恢复研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(3): 334-345.
Jiang Gaolei, Zhang Kexin, Xu Yadong. Research progress of quantitative paleoelevation reconstruction of Tibetan Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(3): 334-345.
- [37] Harrison T M, Copeland P, Kidd W S F, et al. Raising Tibet[J]. Science, 1992, 255: 1663-1670.
- [38] Coleman M, Hodges K. Evidence for Tibetan Plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum estimate for east-west extension[J]. Nature, 1995, 374(6517): 49-52.
- [39] Chung S L, Lo C H, Lee T Y, et al. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago[J]. Nature, 1998, 394: 769-773.

- [40] Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. *Science* 2001, 294, 1671-1677.
- [41] Spicer R A, Harris N B W, Widdowson M, et al. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years[J]. *Nature*, 2003, 421: 622-624.
- [42] Rowley D B, Currie B S. Palaeo-altimetry of the late Eocene to Miocene Lunpola basin, central Tibet[J]. *Nature*, 2006, 439: 677-681.
- [43] 张利云, 丁林, 杨迪, 等. 藏北中中新世淡色花岗岩及流纹岩的成因: 对高原北部边界地壳加厚过程和隆升时代的制约[J]. *科学通报*, 2012, 57(2/3): 153-168.
Zhang Liyun, Ding Lin, Yang Di, et al. Origin of middle Miocene leucogranites and rhyolites on the Tibetan Plateau: Constraints on the timing of crustal thickening and uplift of its northern boundary[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(2/3): 153-168.
- [44] 施雅风, 刘东生. 希夏邦马峰地区科学考察初步报告[J]. *科学通报*, 1964, 10: 928-938.
Shi Yafeng, Liu Dongsheng. A preliminary report of scientific expedition in the Xixiabangma Mountain area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1964, 10: 928-938.
- [45] 周浙昆, 杨青松, 夏珂. 栎属高山栎组植物化石推测青藏高原的隆起[J]. *科学通报*, 2007, 52(3): 249-257.
Zhou Zhekun, Yang Qingsong, Xia Ke. Constant on the Tibetan Plateau uplift inferred from *Quercus* section *Heterobalanus* (Oerst.) Menitsky fossils[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52(3): 249-257.
- [46] 李廷栋. 青藏高原隆升的过程和机制[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.
- [47] 方爱民, 阎臻, 刘小汉, 等. 藏南柳区砾岩中古植物化石组合及其特征[J]. *古生物学报*, 2005, 44(3): 435-445.
Fang Aimin, Yan Zhen, Liu Xiaohan, et al. The flora of the Liuqu Formation in South Tibet and its climatic implications[J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2005, 44(3): 435-445.
- [48] 黄万波, 计宏祥. 西藏三趾马动物群的首次发现及其对高原隆起意义[J]. *科学通报*, 1979, 19: 885-888.
Huang Wanbo, Ji Hongxiang. The first discovery of Hipparion Fauna in Tibet and its implication for Qinghai-Tibet uplift[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1979, 19: 885-888.
- [49] 张兴德, 颀光普. 红崖子三趾马动物群的首次发现及其对青藏高原隆起意义[J]. *甘肃地质*, 1988(9): 87-91.
Zhang Xingde, Xie Guangpu. The first discovery of the Hongtazi Hipparion Fauna and its significance for upheaval of the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Gansu Geology*, 1988(9): 87-91.
- [50] 韩建恩, 邵兆刚, 陈麒光, 等. 青海西宁盆地三趾马、副板齿犀化石的发现及意义[J]. *地球学报*, 2015, 36(1): 115-120.
Han Jian'en, Shao Zhaogang, Chen Qiguang, et al. Discovery and significance of hipparion and parelasmotherium fossils in the Xining Basin, Qinghai Province[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2015, 36(1): 115-120.
- [51] 何德奎, 陈毅峰, 陈宜瑜, 等. 特化等级裂腹鱼类的分子系统发育与青藏高原隆起[J]. *科学通报*, 2003, 48(22): 2354-2362.
He Dekui, Chen Yifeng, Chen Yiyu, et al. Molecular phylogeny of the specialized schizothoracine fishes, with their implications for the uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(22): 2354-2362.
- [52] Sun B, Wang Y, Li C, et al. Early Miocene elevation in northern Tibet estimated by palaeobotanical evidence[J]. *Scientific Reports*, 2015(5): 1-6.
- [53] 赵志军, 方小敏, 李吉均, 等. 酒泉砾石层的古地磁年代与青藏高原隆升[J]. *科学通报*, 2001, 46(14): 1208-1212.
Zhao Zhijun, Fang Xiaomin, Li Jijun, et al. Paleomagnetic dating of the Jiuquan Gravel in the Hexi Corridor: Implication on mid-Pleistocene uplift of the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(14): 1208-1212.
- [54] Wang P, Scherler D, Jing L, et al. Tectonic control of Yarlung Tsangpo Gorge revealed by a buried canyon in Southern Tibet[J]. *Science*, 2014, 346(6212): 978-981.
- [55] 姚小峰, 郭正堂, 赵希涛, 等. 玉龙山东麓古红壤的发现及其对青藏高原隆升的指示[J]. *科学通报*, 2000, 45(15): 1671-1676.
Yao Xiaofeng, Guo Zhengtang, Zhao Xitao, et al. A tropical paleosol at high elevation in the Yulong Mountains and its implication on the uplift of the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(15): 1671-1676.
- [56] Wang W, Zhang P, Yu J, et al. Constrains on mountain building in northeast Tibet: Detrital zircon records from synorogenic deposits in the Yumen Basin[J]. *Scientific Reports*, 2016(6): 1-8.
- [57] Wang W, Zhang P, Pang J, et al. The Cenozoic growth of the Qilian-Shan in the northeastern Tibetan Plateau: A sedimentary archive from the Jiuxi basin[J]. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 2016, 121: 2235-2257.
- [58] 崔之久, 郑本兴. 珠穆朗玛峰地区的喀斯[M]//珠穆朗玛峰地区科学考察报告(1966—1968): 现代冰川与地貌. 北京: 科学出版社, 1975. 169-179.
Cui Zhijiu, Zheng Benxing. Karst nearby Qomolangma[M]//A symposium of Scientific Expedition in the Qomolangma area (1966-1968), Modern glacial and Landforms. Beijing: Science Press, 1975: 169-179.
- [59] 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等. 青藏高原夷平面与岩溶时代及其起始高度[J]. *科学通报*, 1996, 41(15): 1402-1406.
Cui Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, et al. The initial elevation of palaeokarst and planation surfaces on Tibet Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1996, 41(15): 1402-1406.
- [60] 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 Zhijiu, Gao Quanzhou, Liu Gengnian, et al. Relationship of the planation surface and ancient karst with the uplifting of Tibetan Plateau[J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 26(4): 378-386.
- [61] 周姚秀, 库尔提约, 鲁连仲, 等. 西藏古磁研究的新结果[M]//中法合作喜马拉雅考察队. 喜马拉雅地质I. 北京: 地质出版社, 1984: 279-297.
Zhou Yaoshu, Kurdisho, Lu Lianzhong, et al. Donnees paleomagnetiques nouvelles au Tibet-Connaissance fondamentale pour le mouvement du Bloc de Lhasa[M]//sino-French Cooperation in the Himalayan Expedition Team. Himalaya Geology I. Beijing: Geological Publishing House, 279-297.
- [62] 董学斌, 王忠民, 谭承泽, 等. 亚东-格尔木地学断面古地磁新数据与青藏高原地体演化模式的初步研究[J]. *中国地质科学院院报*, 1990, 2(21): 139-144.
Dong Xuebin, Wang Zhongmin, Tan Chengze, et al. New paleomagnetic results from Yadong-Golmud geosciences transect and a preliminary study on the model of terranes evolution in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences*, 1990, 2(21): 139-144.
- [63] Lu H, Fu B, Shi P, et al. Constraints on the uplift mechanism of north-

- ern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 453: 108–118.
- [64] Bai D, Unsworth M J, Meju M A, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan Plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nature Geoscience*, 2010(3): 358–362.
- [65] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. *Geology*, 2000, 28: 703–706.
- [66] Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Science*, 2008, 321: 1054–1058.
- [67] Hubbard J, Shaw J H. Uplift of the Longmen Shan and Tibetan Plateau, and the 2008 Wenchuan (M=7.9) earthquake[J]. *Nature*, 2009, 458: 194–197.
- [68] Zhao J, Yuan X, Liu H, et al. The boundary between the Indian and Asian tectonic plates below Tibet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(25): 11229–11233.
- [69] Zhang Z, Yuan X, Chen Y, et al. Seismic signature of the collision between the east Tibetan escape flow and the Sichuan Basin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 292: 254–264.
- [70] Zhang H, Oskin M E, Liu Z J, et al. Pulsed exhumation of interior eastern Tibet: Implications for relief generation mechanisms and the origin of high-elevation planation surfaces[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2016, 449: 176–185.
- [71] Fu B, Shi P, Guo H, et al. Surface deformation related to the 2008 Wenchuan earthquake, and mountain building of the Longmen Shan, eastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Science*, 2011, 40: 805–824.
- [72] Chen Yun, Li Wei, Yuan Xiaohui, et al. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2015, 413: 13–24.

Geological features, the formation and the evolution of the Qinghai–Tibetan Plateau

WANG Zhentao

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

Abstract With its special place in the Earth, the Qinghai–Tibetan Plateau is always a research hotspot to attract worldwide attentions. However, there remain many contentious issues to be further explored. This paper focuses on the analysis and the discussion of the uplift process, the geological evidences, and the formation and evolution process of the Qinghai–Tibetan Plateau. This plateau is an unique geological unit, and has a strips–blocks interphase tectonic framework with crust of huge thickness. The geological evidences for the uplift of the Qinghai–Tibetan Plateau can be found in the paleontology, the sedimentology, the paleogeomorphology, the karstology and the paleomagnetism. However, these specific details of the uplift process might have different interpretations. Great progress has been made in detecting fine structures of the earth’s crust and mantle. Now, some consensus has been reached among the academic circles on the location, the geometry and the movement direction of the subduction beneath the Qinghai–Tibetan Plateau.

Keywords Qinghai–Tibetan Plateau; geologic feature; formation and evolution; uplift

(责任编辑 韩星明)