

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

科技述评

青藏高原构造演化及隆升的简要评述

肖序常 王军

(中国地质科学院地质研究所,北京,100037)

内容提要 根据近年古生物区系、岩相古地理、地质构造以及古地磁等的研究,特别是晚古生代—白垩纪古生物区系、分异度指数特征以及古地磁数据等,笔者认为,从晚古生代—白垩纪印度板块和青藏高原(欧亚板块)之间不存在至今还流传引用的浩瀚深邃宽达6000~7000km、向东敞开的特提斯大洋,其时印度板块与欧亚大陆之间呈现小洋盆、海湾、裂陷槽与微古陆相间的构造格局;也未发生过印度大陆和青藏高原南部地体跨这一特提斯大洋自南向北作长距离漂移。笔者对近年在高原进行的大地水准测量、GPS、同位素年代学($^{39}\text{Ar}/^{40}\text{Ar}$, 裂变径迹等)结果进行了分析研究,扼要地阐述了青藏高原隆升过程和速率;提出高原隆升大体可分为三大阶段,即:白垩纪—始新世慢速隆升期,中新世—上新世中等速率隆升期及更新世—全新世快速隆升期;隆升速率随时间更新而增快,在空间上隆升速率有自北而南由慢到快的趋势;同时在中新世和更新世,出现两次突变增快转折点。根据近10年地质和地球物理资料,特别是深部地球物理资料,笔者再次提出,青藏高原的隆升机制是多因素、多阶段和多层次的不均匀隆升。高原地壳缩短、加厚和隆升受到三大力源控制:一是来自南面印度板块的挤压及其四周塔里木、扬子以及中朝地台的滞后阻力,产生向高原内不均匀的汇聚挤压和导致高原内各块体位移速率的差异,以及在空间上出现不同类型、层次的构造变形,是控制高原地壳缩短、加厚和隆升的基本因素;其二是高原内的热力作用、热效应,不仅能增强地壳的蠕动变形,造成地壳的缩短、加厚,而且促使地壳发生重融、热扩散,从而产生低密度空间,为地壳上浮、隆升提供有利条件。三是构造均衡调整对高原隆升的控制作用,上新世以后,东、西两面犄角(构造结)仍保有较强挤压外,印度板块主体向北挤压相对减弱,压应力相对松弛,从而引起均衡调整、“下沉山根”将逐渐抬升,促使地壳隆升。

关键词 特提斯洋 演化和隆升 青藏高原

1 关于特提斯(Tethys)的形成和演化

60年代板块构造学说兴起后,一些地质学家将喜马拉雅—西藏高原作为古板块构造演化、陆—陆碰撞造山带研究的典范地区;较早 R. S. Dietz 和 Holde J. C. [1] 提出:约在200Ma前(晚古生代—三叠纪)在欧亚大陆和非洲—冈瓦纳大陆之间存在一向东开口宽达6000~7000km的古特提斯大洋(Paleo-Tethys),并认为青藏高原是由包括印度在内的冈瓦纳大陆自北部不断解体、分裂,自高纬度跨越这一大洋相继增生到欧亚大陆的地体组成,以上认识我们称为“大洋、大漂移”观点。十多年来已有不少地学家对这一观点提出质疑[2~10],然而直到近几年国内、外仍有不少地学家沿用、推崇“大洋、大漂移”观点[11~14],而分歧焦点和地区是在青藏高原—特提斯地带;因而就我们近几年工作,结合中、外有关青藏高原考察资料,对地学界关注的所谓“特提斯洋之谜”(The Myth of Ocean Tethys)作一剖析,不仅可深化对高原本身形成和演化的认识,同时对古大陆重建以及大陆动力学特征等有着重要意义。

注:本文是地质矿产部“八五”研究成果的一部分。

本文1998年3月收到,4月改回,章雨旭编辑。

1.1 晚古生代—早中生代印度大陆与欧亚大陆之间不存在深邃的“古特提斯大洋”

古地磁学近 30 年进展,无疑对板块构造提供了信息和依据,但是由于实验技术不尽完善以及强烈热事件等,显然,在漫长地质年代,板块构造演化,各板块的位移,时、空分布等特征,必须结合古生物、古地理进行全面分析研究,才可能得到接近于实际、正确的认识;本节拟从古生物、沉积古地理、蛇绿岩以及古地磁诸方面提供的资料,对以上问题作初步论证。

古生物方面论据(表 1,图 1):晚石炭世—二叠纪具有印度地区特征的所谓冈瓦纳冷温型动物群及植物群,在 70 年代初到近年在青藏高原已有多处发现,对此我们作了归纳、统计(表 1),从表 1 中可看出,具有印度大陆代表性的冈瓦纳动物及植物群为主的分异度指数在藏北冈底斯(拉萨)地体高达 80。还值得提到的是,早二叠世在喜马拉雅地体(与印度大陆不可分割)及其北冈底斯(拉萨)、羌塘地体内出现了代表陆棚、浅海和温暖型的筴类 *Verbeckina* sp.、*Neoschwagerina* sp. 以及 *Schwagerina* sp. 等^[15],众所周知,以上筴类已属华夏动物群。

古生物群落的时空分布最能说明古地理、古环境和古气候特征。两大陆腕足类、珊瑚和古植物的雷同,显然不可能是远距离的漂洋过海(“古特提斯大洋”),所谓“平行演化(parallel evolution)”也必须具有相近的古地理环境等条件。近年中英合作西藏考察,A. B. Smith 和徐均涛^[9]对晚古生代,尤其是早二叠世古生物采用“分布吝啬分析法”(parsimony analysis of endemism),进行了更为准确的统计,指出晚古生代不存在阻止生物交换的大洋障

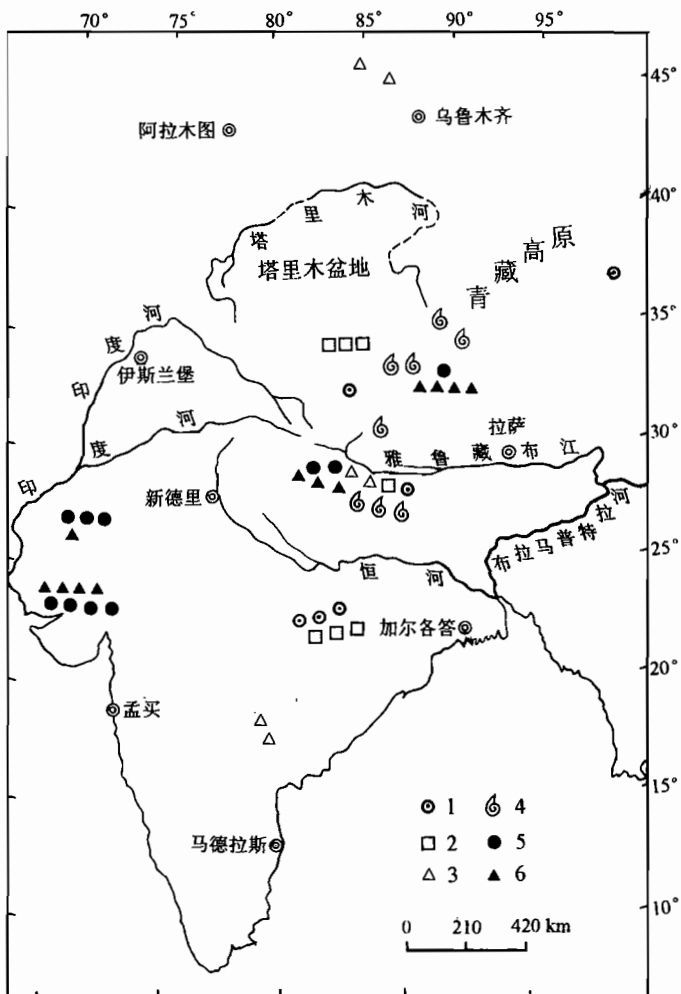


图 1 青藏高原及邻区晚古生代—早白垩世动、植物群分布图
Fig. 1 Distribution of fauna and flora of Late Paleozoic to Early Cretaceous in the Qinghai-Tibet plateau and adjacent area

- 1—晚石炭世—二叠纪冈瓦纳相植物群; 2—晚石炭世—二叠纪冈瓦纳相冷温带动物群; 3—三叠纪—早侏罗世四足兽类; 4—三叠纪菊石类; 5—侏罗纪菊石; 6—晚侏罗世—早白垩世菊石类
- 1—Gondwanic flora of Late Cretaceous—Permian; 2—cold-water-Gonwanic fauna of Late Carboniferous—Permian; 3—tetrapoda of Triassic—Early Jurassic; 4—ammonoid of Triassic; 5—ammonoid of Middle Jurassic; 6—ammonoid of Late Jurassic—Early Cretaceous

碍^[9]。

沉积相特征:自喜马拉雅山到昆仑山,晚石炭世—二叠纪,不具有广泛典型的深海沉积和确切的蛇绿岩,主要是滨、浅海相和海陆交互相沉积,只在局部狭长地带形成较深裂陷槽^[15]。这一论据,在中英合作西藏考察中也明确指出:“在青藏高原没有任何晚古生代隆升和大洋沉积的证据”^[9]。

表 1 晚石炭纪—二叠纪“冈瓦纳相” 1.2 中生代印度大陆与欧亚大陆之间也不存在
动、植物群落对比 广阔深邃的“新特提斯大洋”

Table 1 Similarities of faunas and
floras of the "Gondwana facies" (C₃-P)

地 区		印度次大陆	西藏南部	西藏北部	澳大利亚	南极洲
植物群	<i>Glossopteris</i>	+	+	+	+	+
	<i>Gangamopteris</i>	+	-	-		
	<i>Schizoneura</i>	+	-	+		
	<i>Sphenophyllum</i>	+	+	+		
	<i>Cordaites</i>	+	-	+		
	<i>Tizygia</i>	+	-	-		
动物群	<i>Eurgedesma</i>	+	+	+		
	<i>Stepanoviellia</i>	+	+	+	+	
	<i>Monodiezodina</i>	+	-	+		
	<i>Lytvolasma</i>	+	+	+		
分异度指数		100	50	80		

注:印度次大陆资料据文献[6];西藏南部和西藏北部资料据文献[9,16]。

从现有中生代时期提供的古生物、沉积相特征,说明印度大陆与青藏高原曾经只出现过小洋盆,较深裂陷槽(详后)、海湾以及陆表海。S. Chatterjee^[17]早于 80 年代中期提出,晚三叠世陆生的印度四足兽群落在北美、亚洲均有发现;在中国新疆和云南也有多处发现,据我们统计,其分异度指数高达 71(表 2)。

S. Chatterjee^[17]认为这些陆上四足兽是不可能越洋过海的;Nicholas Hotton^[18]近年对全球四足兽的分布作了广泛、较深入对比研究,也证实了这一时间印度和欧亚大陆,非洲和北美之间无广阔大洋,“联合古陆”(Pangaea)未曾解体 and 发生大规模离散。

我们再以代表“新特提斯洋”消减的雅鲁藏布缝合带为界,对其南面——喜马拉雅—印度大陆和北面——拉萨(或冈底斯)、羌塘、巴颜喀拉以及昆仑地体等的三叠纪

一早白垩世的菊石群落,作对比统计(表 3,4,5;图 1)。从表中可看出在喜马拉雅—尼泊尔(印度大陆北缘)的三叠纪菊石群落,在藏北羌塘及更北巴颜喀拉以及昆仑地带,分异度指数高达 80;到中侏罗世下降到 28(表 3,4);但从晚侏罗世到早白垩世藏北菊石分异度指数高达 87(表 5)。菊石尽管善于漂游,但多生存在浅海、温暖海域;而侏罗世—早白垩世的菊石 *Himalayites* sp.、*Spiticeras* sp.、*Indocephalites* sp. 以及 *Virgatosphinctes* sp. 等又是具有印度大陆北缘地区性特征的菊石群;因之,我们认为三叠世—早白垩世青藏高原不存在广阔、足以阻碍生

表 2 印度和青藏高原三叠纪—早侏罗世四足类对比
Table 2 Similarities of the Tetrapoda (T—J₁)
between India and Qinghai-Tibet plateau

种 属	北美洲	欧洲	非洲	中 国	东亚	南美洲
<i>posaurus Metoposauridae</i>	+	+	+	+(T ₃)	+	-
<i>Parapedon Rhynchosauridae</i>	+	+	+	+(J)	-	+
<i>Parasuchus Paraschidae</i>	+	+	+	-	+	-
<i>Typhothorax Stagonolepididae</i>	+	+	-	-	+	+
<i>Exaeretodon Traversodontidae</i>	+	+	-	+(T ₂₋₃)	-	+
<i>Malerisaurus Protorosauridae</i>	+	-	-	+(T)	-	-
<i>Walkeria Podokesauridae</i>	+	+	+	+(J ₁)	-	-
分异度指数	100	86	57	71	43	43

注:资料据文献[17,19]

物交换的大洋。还值得提到的是近几年一些地质学家先后提到,侏罗纪—早白垩世“雅鲁藏布断裂带当时应为开阔的(新)特提斯,成为南北大陆陆上动、植物不可逾越的巨大障碍”,它们保持着彼此迥然不同的面貌^[21]。然而在雅鲁藏布江北、拉萨地体内大体相当于中—晚侏罗世的多底沟群中已发现代表上冈瓦纳群的典型植物化石:*Ptilophyllum* 植物群^[15],更北到东巧及其以北羌塘地体南的中侏罗世(可能包括上侏罗世)的木嘎岗日群所

产植物: *Cladophlebis* sp., 在雅鲁藏布江以南定日区也有产出, 并与 *Ptilophgllum* sp. 共生^[15], 从上述植物的分布, 显然雅鲁藏布江缝合带不可能作为“不可逾越的巨大障碍”。

近年来有关青藏高原沉积相、古地理资料说明: 中生代(晚白垩世前), 沿班公湖—怒江和雅鲁藏布江狭长地带确实存在海相复理石、放射虫硅质岩以及典型洋壳—上地幔的蛇绿岩组合; 但在前者之北羌塘—唐古拉地区以浅海—陆棚海沉积为主, 向东至昌都一带, 侏罗系则多为海陆交互相和陆相沉积, 其南——雅鲁藏布江之北为冈底斯—念青唐古拉(拉萨)地体, 侏罗纪—早白垩世沉积主要为浅海—滨海相及海陆交互相沉积, 晚白垩世则出现大量火山岛弧钙碱性喷发岩; 雅鲁藏布江之南, 北喜马拉雅地带则是众所周知的被动陆缘或稳定型沉积。因而, 侏罗纪到晚白垩世前不存在所谓“新特提斯大洋”, 班公湖—怒江和雅鲁藏布江蛇绿岩缝合带仅是狭长的裂陷槽或小洋盆, 不具有广阔浩瀚的大洋。

为说明上述问题, 我们从蛇绿岩提供的信息, 对洋盆规模作了估算, 尽管在古扩张速率和洋盆演化时限等方面, 目前还难得到精确参数, 但洋盆规模大体上可得到一半定量数字, 根据笔者数据^[22], 班公湖—怒江缝合带所代表洋盆宽度估算为 1300km 左右。雅鲁藏布江缝合带所代表洋盆宽度也为 1300km 左右。

综上所述, 从古生物、沉积古地理以及蛇绿岩所提供的资料和数据, 6000~7000km 的特提斯大洋是不存在的, 印度大陆与青藏高原—

表 4 中侏罗世印度大陆与青藏高原菊石群落对比

Table 4 The similarities of ammonites (J₂) between India and Qinghai-Tibet plateau

菊石	印度次大陆			尼泊尔	青藏高原	
	Kach-chy	Jai-salmer	Spiti		藏南	藏北
<i>Macrocephalites</i>	+	+	+	+	+	-
<i>Indocephalites</i>	+	+	-	+	-	+
<i>Kamptokephalites</i>	+	+	+	-	+	+
<i>Nothocephalites</i>	+	+	-	-	-	-
<i>Dolikephalites</i>	+	+	+	-	-	-
<i>Kheraicerias</i>	+	-	-	-	-	-
<i>Epinorhynchoceras</i>	+	+	-	-	-	-
分异度指数	100	85	43	28	28	28

注: 印度次大陆菊石组合据文献[20]; 青藏高原菊石组合由刘桂芳提供。

表 3 三叠纪青藏高原及南邻区菊石分布对比

Table 3 Similarities of the Triassic ammonites between India and Qinghai-Tibet plateau

时代	菊石	喜马拉雅	尼泊尔	拉 萨	羌 塘	喀喇昆仑	巴颜喀拉及
T ₁	<i>Owenites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Flamingites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Proptuchites</i>	+	?	+	?	?	?
	<i>Anotocerao</i>	+	?	?	?	?	+
T ₂	<i>Gymnites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Hollandites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Leiophyllites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Japonites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Ptychites(ragifer)</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Paraceratian</i>	+	?	?	?	?	?
	<i>Balatonites</i>	+	+	+	+	+	+
	<i>Procladiscites</i>	+	?	+	+	+	+
T ₁	<i>Sturia</i>	+	+	?	?	?	?
	<i>Protrachyceras</i>	+	?	+	+	+	+
	<i>Trachceras</i>	+	?	+	+	+	+
	分异度指数	100	60	80	80	80	80

表 5 晚侏罗世—早白垩世晚期印度大陆与青藏高原菊石群落对比

Table 5 The similarities of ammonites (J₃—K₁) between India and Qinghai-Tibet plateau

菊石	印度次大陆			尼泊尔	青藏高原	
	Kach-chy	Jai-salmer	Spiti		藏南	藏北
<i>Vigatosphinctes</i>	+	+	+	+	+	+
<i>Aspidoceras</i>	+	+	-	+	-	+
<i>Berriadla</i> sp.	+	+	+	+	+	+
<i>Himalayites</i>	+	-	+	+	+	+
<i>Spiticeras</i>	+	-	+	+	+	+
<i>Neocomites</i>	+	-	-	+	+	+
<i>Lytocerasinae</i>	+	-	-	+	-	-
<i>Acanthophalites</i> sp.	+	-	-	+	-	+
分异度指数	100	37	50	100	63	87

注: 印度次大陆菊石组合据文献[20]; 青藏高原菊石组合由刘桂芳提供。

亚洲南缘之间,未曾出现过广阔海洋分隔。

1.3 古地磁的信息

印度大陆向北漂移、跨越 6000~7000km 的特提斯大洋的观点,可能受到 50 年代英国地球物理学家 M. S. P. Blackett 等的影响,Blackett 对印度侏罗纪一早第三纪的德干高原玄武岩进行了测定(未考虑磁极倒转等),提出在侏罗纪磁倾角为向上 64°,早第三纪向上 26°,到第三纪中期向下磁倾为 17°,这就是说印度大陆自侏罗纪到现在,向北大约漂移了 6000~7000km。但是,这一结果是假定地球偶极子场和地球地理极保持不变条件下得出的;目前地学家一般认识是,只是在晚第三纪以来磁极与地理极大致不变,因而 Blackett 等提出的侏罗纪一早第三纪,印度大陆向北大约漂移 6000~7000km 的结论,是存在问题、不宜采用的。近年我们对 T. Klootwijk^[23]、林金录、D. R. Watts^[19]、H. G. Owen^[3]以及亚东—格尔木 GT 断面(1990—1991)所测的青藏高原及邻区古地磁资料进行了较系统的分析研究,说明晚古生代—侏罗纪青藏高原处于南纬 15°S~7°S,而印度大陆北部处于南纬 15°S 左右^[22~23],也即是青藏高原在此期间,基本与印度大陆相连,未出现“特提斯大洋”,仅可能出现裂陷槽、海湾、小洋盆及陆表海域。这一格局与当年 A. Wegener^[24]根据晚古生代—中生代岩相古地理特征的再造图相似。从以上资料,印度大陆与澳大利亚和南极的分离,当在侏罗纪以后,很可能在白垩纪一早第三纪时期。青藏高原—印度大陆—澳大利亚乃至南极洲晚古生代—侏罗纪相距不远或基本相连,以及它们之间古生物群落的类同等,可能受到古纬度带和古气候带的控制。至于白垩纪一早第三纪以来印度大陆的“北上”与澳大利亚和南极洲的分离,其发生机制、动力源以及更多古地磁数据等,限于篇幅这里不再论述。

2 有关青藏高原隆升定量—半定量数据略述

限于篇幅,本文仅列出近 30 年以来在珠穆朗玛峰及其邻区运用 GPS 及精密水准测量数据^[25](表 5、表 6)及有关运用热年代法得出的数据(表 7)。

青藏高原隆升是一个长时期的在时间和空间上不均匀的演化过程,高原的隆升幅度和隆升速率,无论采用何种方法,目前只能得到概略数据。近十几年来,有人从古生物、古气候、沉积—古地理,古地貌、岩溶、夷平面以及 PTt 轨迹等探讨高原隆升幅度和速率;有人针对高原地质特征,在高原南部及喜马拉雅周边,采用热年代学研究高原隆升;近期还开展了用 GPS、SLR、VLBI 以及常规精密水准测量研究高原隆升。

以上看出 30 年来,珠穆朗玛峰隆升速率异常快,达 37mm/a,而珠穆朗玛峰地区为 3.6~4.0mm/a。

表 6 珠穆朗玛峰地区垂直位移
及上升速率(1966—1992)

Table 6 Vertical displacement and uplift
rate of the Qomolangma (1966~1992)

点 名	至珠穆朗 玛峰距离 (km)	1966— 1992 (mm)	上升速率 (mm/a)
邦城 15	32	+105	+4.0
Tv 支 1	21	+87	+3.3
平均	26	+96	+3.6

表 7 珠穆朗玛峰垂直位移
及上升速率(1966—1992)

Table 7 Vertical displacement and uplift
rate of the Qomolangma (1966~1992)

年 份	1975~1992	1966~1975	1966~1992
高程变化(m)	+0.59	+0.37	+0.96
上升速率(mm/a)	+35	+41	+37

综上所述,广袤的高原、漫长的地质时期,隆升速率显然是非线性的,表 8 中数据又作了归并,因而各区隆升速率是较粗略的但仍可获得一些规律性(图 2)。

(1)高原隆升速率,从老到新有愈来愈快趋势,大体归纳如下:

I₁ 早期(60~50Ma±)为极慢速隆升期:隆升速率主要在 0.012~0.064mm/a 之间。

I₂ 早期(50~25Ma±)慢速隆升期:隆升速率主要在 0.07~0.31mm/a 之间。

II₁ 中期(25~11Ma)中等速率隆升期:隆升速率在 0.13~0.62mm/a 之间。

II₂ 中期(10~3Ma±)中等速率隆升期:隆升速率在 0.30~2.05mm/a 之间。

III 晚期(2~0.5Ma±)快速隆升期:隆升速率在 1.6~5.35mm/a 之间。

IV 近期(0.5Ma 以来)极快速隆升期:隆升速率为 4.5mm/a(喜马拉雅可达 10~12mm/a,乃至 12mm/a)。

以上速率可看出上新世或中新世末(3~10Ma)和更新世(2Ma)以来,隆升速率有突变加快趋势(图 2)。

(2)高原隆升速率,从南到北有愈来愈慢的趋势。从现有零星数据:喜马拉雅山区自上新世以来,隆升速率从几毫米/年到十数毫米/年,而向北到阿尔金山区则减到 0.42 mm/a^[27];如果接近几十年隆升速率直接测量,这一规律性更为明显:南边喜马拉雅珠穆朗玛峰隆升速率高达 37 mm/a,向北拉萨—邦达为 10 mm/a,稍北狮泉河—萨嘎一带为 8.9 mm/a,再北到喀喇昆仑一带减至 6~9 mm/a,再北到阿尔金断裂北缘阿克塞一带减到数 mm/a~5.2 mm/a^[27]。

(3)以上提供的高原隆升数据,与其构造演化、沉积、古生物等方面提供的依据基本是一致的;新特提斯有限洋盆的闭合,始于晚白垩世—始新世

(65~40Ma),此时不可能隆升或隆升十分有限;其后出现的沉积建造,古生物以及岩浆活动特征,与上述从慢速到快速隆升速率,基本一致,相互印证。

(4)高原约自上新世晚期—更新世以来,出现快速隆升,从高原南部喜马拉雅地体(含高喜马拉雅)隆升速率来看,如不考虑近数年直接测量数据,东段:隆升速率为 1.14~14.19mm/a,

表 8 始新世—全新世青藏高原隆升速率

Table 8 Uplift rate of Qinghai-Tibet plateau from Eocene to Holocene

方法	地区(从南—北)	时限(Ma)	隆升速率 (mm/a)	资料来源
精密水准 测量, GPS+ SLR	1. 珠穆朗玛峰	最近 30 年	37	[25~ 27]
	2. 近珠穆朗玛峰区	最近 30 年	4~15	
	3. 拉萨(冈底斯)区	最近 30 年	9~10	
	4. 喀拉昆仑—昆仑山区	最近 30 年	6~9	
	5. 北阿尔金山区	最近 30 年	5.1	
裂 变 径 迹	喜马拉雅西北部	55~20	0.07~.22	[28]
		23~11	0.13~0.39	
		10~3	0.30~1.10	
		2.0~0.5	1.6~4.5	
	喜马拉雅中部	10~3	0.07~1.05(?)	[29~ 31]
		2.0~0.5	3.50~4.67	
	喜马拉雅中东部	11~8	0.45~0.49	[31]
		喜马拉雅东部	25±	0.31
	11.25~3.83		0.62~1.14	
	3.82		1.14	
冈底斯山东端	25~11	0.31~0.62	[32]	
	10~3	0.66~2.05		
	2~0.5	1.82~5.35		
拉萨(冈底斯)区	60~55	0.012~0.064	[31]	
	25~27	0.25		
西昆仑—喀喇昆仑	4.16~3.09	0.10~1.97	①	
	3.62~2.14	0.86~2.82		
新构造学 和地貌学	喀喇昆仑(西藏西北部)	全新世	4~5	②

①王军,1998(博士论文);②刘庆,1993(博士论文,巴黎七大)。。

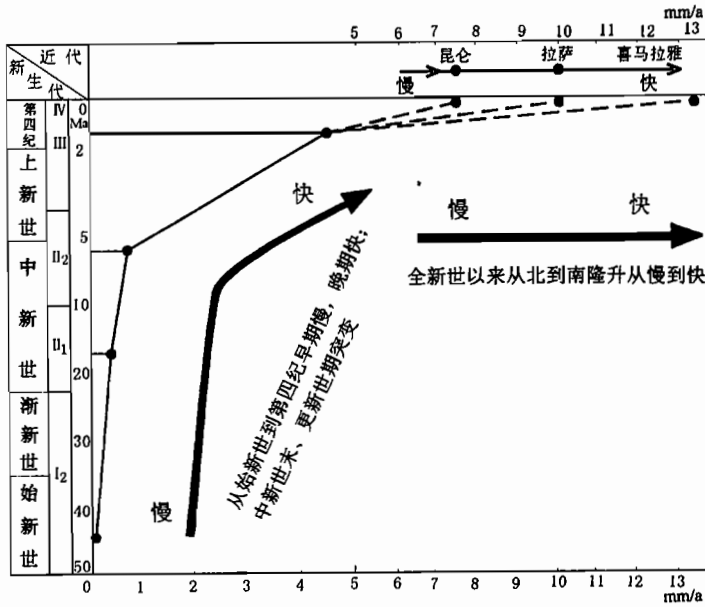


图2 青藏高原新生代以来升降速率示意图

Fig. 2 Simplified figure of the uplift rates of the Qinghai-Tibet plateau since Cenozoic

中段为: 0.175~4.67 mm/a, 西段为: 1.6~4.5 mm/a。如我们取数据较多的西段, 估算的平均隆升速率为 3 mm/a 计数, 则 2Ma 以来该区隆升幅度约 6km, 这一幅度与剥蚀沉积和目前高程大体接近。显然, 整个高原演化中, 隆升速度是非线性的, 很可能存在平静期和突发期(如近数十年珠穆朗玛峰地段), 较精确的隆升速率估算, 仍有待今后深化研究。

(5)方法方面: ①采用各参数也有待更多工作予以校正; 如地温梯度, 由于高原特殊地质情况、高山地区、高热流值采用何数值为宜? 目前只好参照西段南迦巴洛山地区较高的

地温梯度 40℃/km, 磷灰石封闭温度也采用该区高值 150℃, 以上参数是否也适用于高原中段? 有待进一步校正。②一个地区冷却历史和温度与一个岩体中矿物的冷却历史和温度, 一般可视为一致或正相关关系, 但两者适用范围大小、规模, 很可能有差异, 这方面, 目前未见确切论证。③我们测试样品, 部分尚未获得结果, 采样数量也不够多; 此外, 限于篇幅未附裂变径迹长度统计, 部分磷灰石退火带下限径迹长度不集中在标准的 14~18μm 区内等, 均影响文中提供数据的代表性, 有待今后工作补充、修正。

3 青藏高原形成和隆升机制

近十多年来国内外对高原形成、地壳缩短、加厚和隆升机制的论著, 不胜枚举。地学家们常侧重从各自学科、专业以及所掌握资料出发予以论述, 各有千秋, 不无可取之处。下文仅根据近年来所获得的地质和地球物理资料进行综合分析, 对一些众所关注的问题作概括简述。

(1) 关于印度板块与青藏高原拼接碰撞带的结构、构造以及动力学特征, 根据 80 年代初、中期, 90 年代初、中期两轮地球物理探测, 特别是近年 INDEPTH 的实施, 从深反射地震探测和 MT 测深等^[33~36], 可以初步推断, 印度板块未长距离向北楔入, 其岩石圈上地幔, 于雅鲁藏布江以南约以 30°倾角向北下插, 但是受阻于雅鲁藏布江以北的热熔层。

(2) 关于青藏高原地壳缩短、加厚和隆升机制, 笔者再次强调在时、空上具有“多阶段、多层次和多因素”的特征; 其动力学机制受到三大力源的制约: ①来自南面为主的印度板块的挤压及其周边塔里木、扬子和中朝地块(地台)的滞后阻力, 产生向高原内不均匀的汇聚挤压, 导致高原内各块体位移速率的差异以及在空间上出现不同类型、层次的构造变形, 是控制高原地壳缩短、加厚和隆升的基本因素。②高原内的热力作用、热效应, 根据近年 MT 热流测量、深地震测深和层析成象等资料, 可以清晰看出在高原中、南部的冈底斯及羌塘、唐古拉地体以南深

部存在低阻、低速和高导层^[36,37]及高热流值^[38]。也即是这一带具有“热壳、热幔、厚壳”特征。热力作用不仅能增强地壳的蠕变变形、造成地壳的缩短和加厚,而且可促使地壳发生重熔、热扩散,从而产生低密度空间,为地壳上浮、隆升提供有利条件。③均衡调整对高原的控制作用,晚第三纪以来高原通过上述各种变形构造以及热力作用,特别是在羌塘北部—可可西里地带形成了较厚地壳和厚岩石圈上地幔,具有强大的静载荷压,即令高原等效弹性板厚度巨大,也抗衡不住这一巨大静载荷压作用,因而造成岩石圈的向下弯曲,呈现不均衡状态—软流圈内形成“下沉山根”与“地表山隆”互成镜像形态;但到后期,即上新世—更新世以后,除东面印缅犄角和西南帕米尔犄角仍保有较强挤压外,印度板块向北挤压相对减弱,压应力相对松弛,从而引起均衡调整,“下沉山根”将逐渐抬升,促使地壳上隆。

以上论据说明,青藏高原地壳缩短、加厚和隆升,既非“长距离楔入模式”^[39]“推土机模式”^[14],与 Zhao 等所提模式^[40]也不一致,更非近年 Willett 等^[41]的“亚洲大陆以缓倾长距离向高原俯冲”模式。

(3) 根据以上资料,对高原的形成和演化我们的设想是:①早期(晚白垩世—渐新世)高原呈现拼接碰撞期缓慢隆升阶段;印度板块以缓倾角向北俯冲,受阻于雅鲁藏布江以北冈底斯一带低速、熔融层。②渐新世—中新世为主,高原以中等速率抬升,地壳缩短、加厚和隆升量不大;地壳上部脆性变形—冲断、逆冲叠覆为主,促使地壳缩短和加厚。③上新世—更新世以来,高原隆升速率加快,是高原地壳缩短、加厚和隆升的主要时期;地壳出现脆性—脆韧性大型走滑断裂为主;地壳中、下部出现脆韧性—塑性变形构造为主,促使高原地壳缩短、加厚和隆升。④在空间上,冈底斯—羌塘地带的隆升,似受到较强热力作用的影响为主;晚期更新世以来,高原北部、羌塘北部、可可西里—昆仑山以南,山根的抬升、均衡调整,对隆升起到一定作用。

(4) 青藏高原处于印度洋向北扩张的前沿地带,自第三纪以来,一直受到南来为主的挤压应力的影响,同时它又对邻区产生一定影响;但南来的压应力分别为高原各块体间不同变形构造所吸收,特别是阿尔金走滑断裂,对南来挤压起到阻挡和转换作用,使南来挤压转变为北东水平力,而中国中东部(102°E)南北向构造带对南来的北东向挤压也起到阻挡作用;因而我们认为来自印度板块或印度洋向北扩张所产生的推挤作用,对天山以北和 102°E 以东可能影响不大或较大减弱。联系到塔里木以北,天山—阿尔泰山至今尚未有确切的新生代侵入岩(或较多岩浆活动)的报道,也间接说明南来挤压对天山无强烈影响。

(5) 青藏高原地壳的缩短、加厚和隆升是几千万年来的地质历史演化,非线性演变过程;本文讨论中,地球物理资料、数据占有重要地位,但它们可能只反映新生代后期以来千百万元的深部地球物理状况,尚不可能确切地反映各地质时期高原地壳—岩石圈上地幔结构、构造演化的实际情况;因而有待于今后地球物理、地球化学、同位素年代学以及高温、高压试验技术等多学科相互渗透,提供更多数据和更接近于实际的深部地质过程的模拟。

王世成教授、吴浩若研究员、刘桂芳研究员、许志琴院士、赵文津研究员、姜枚研究员、高锐研究员、管焯副研究员、魏文博教授、陈乐康教授等为本文提供了有关资料,在此向上述各位致以衷心谢忱。

参 考 文 献

- 1 Dietz R S, Holden J C. The breakup of Pangaea. in Tugo wilson ed. Continents adrift. Freeman, 1970.
- 2 Crawford A R. Gondwanaland & Pakistan Region. in Abul Furah & Dejong K A. eds. Geodynamics of Pakistan Region. Geol. Survey of Pakistan, Quetta, 1979. 103~110.

- 3 Owen H G. Continental displacement and expansion of the Earth during the Mesozoic and Cenozoic. *Phil. Trans. R. Soc.* London, 1976, 281A, 223~291.
- 4 肖序常,陈国铭,朱志直. 祁连山古蛇绿岩的地质构造意义. *地质学报*, 1978, 52(4): 281~295.
- 5 肖序常,曲景川,陈国铭,朱志直,顾庆阁. 中国特提斯喜马拉雅蛇绿岩及其地质构造意义. 见: *国际交流地质学术论文集*, (1) 构造地质. 北京:地质出版社, 1980. 19~24 页.
- 6 Ahmad F. "Gondwanaland", the concept that failed, Monograph, Birbal Sahni Institute of Paleobotany. Lucknow. 1978.
- 7 Ahmad F. The myth of oceanic Tethys. *Bollettino della societa, Paleontologica Italiana*, 1982, 21(2-3): 153~168.
- 8 Stocklin J. Tethys evolution in the Afghanistan—Pamir—Pakistan Region. in Sengör A M C ed. *Tectonic evolution of the Tethyan Region*. Kluwer Acad. Publishers, 1989.
- 9 Smith A B, Xu Juntao. Paleontology of the 1985 Tibet Geotraverse, Lhasa to Golmud. in Chang Chenfa, Shackleton R M eds. *The Geological Evolution of Tibet*. Beijing: Science press, 1990. 49~107.
- 10 林金录, Watts D R. 青藏高原古地磁研究. 见中—英青藏高原综合地质考察队主编. *青藏高原地质演化*. 科学出版社, 1990. 242~282 页.
- 11 Shackleton R M, 常承法. 青藏高原新生代隆起和变形:地貌证据. 见中—英青藏高原综合地质考察队主编. *青藏高原地质演化*. 北京:科学出版社. 1990. 372~383.
- 12 常承法. 青藏高原地质构造演化, 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文选. 北京:科学出版社, 1992. 243~255.
- 13 Dewey J F, Bird J M. Mountain belts and new global tectonics. *J. Geophys. Res.*, 1970, 74(4): 2625~2467.
- 14 Dewey J F, Shackleton R M, Chang Chengfa, Sun Yiyin. The tectonic evolution of the Tibet plateau. in Chang Chenfa, Shackleton R M eds. *Geological evolution of Tibet*. Beijing: Science press, 1990. 379~408.
- 15 西藏自治区地质矿产局. *西藏区域地质志*. 北京:地质出版社, 1993.
- 16 杨遵仪,胡昌铭,熊斌. 阿里早石炭世及早二叠世腕足动物群. 见杨遵仪,聂泽同主编. *西藏阿里古生物*. 武汉:中国地质大学出版社, 1990. 80~86.
- 17 Chatterjee S. A new Theropoda Dinosaur from India with remarks on the Gondwana—Laurasia connection in the late Triassic. *Gondwana Six- Stratigraphy sedimentary and Paleontology*, 1987, 183~188.
- 18 Nicolas Hoton III. Global distribution of terrestrial and aquatic tetrapods, and its relevance to the position of continental masses, in Sankar Chatterjee, Nicholas Hotton III eds. *New concepts in global tectonics*. Texas Tech. University Press, 1992. 267~289.
- 19 Sun Ailing, Li Jinling, Ye Xiangkui, Dong Zhiming, Hou Lianhai. The chinese fossil reptiles and their kins. Beijing: Science press, 1992.
- 20 Jai Krishna. Callovian-Albian Ammonoid stratigraphy and palaeogeography in the Indian subcontinent with special reference to the Tethys Himalaya. *Himalayan Geology*. 1989, 11: 432~72.
- 21 文世宣. 青藏高原大陆漂移的古生物新证据. 见: 中国青藏高原研究会第一届学术讨论会论文选. 北京:科学出版社, 1992. 308~313 页.
- 22 肖序常,李廷栋,陈炳蔚,刘训,姚培毅,鲍佩声,陈智梁,潘桂棠. 青藏高原岩石圈结构、构造演化及隆升. 广州: 优秀科技出版社. 1998.
- 23 Klootwijk C T. A review of paleomagnetic data from the Indo—Pakistan fragment of Gondwanaland. in *Geodynamics of Pakistan*, 1979, 45—80.
- 24 Wegener A. *The origin of continents and Oceans*. Methuen & Co. London, 1924.
- 25 陈俊勇,张骥,刘允诺. 珠穆朗玛峰及其北毗邻地区的地壳运动,重力场和大气折光. *科学通报*, 1994, 9(13): 1204~1207.
- 26 张青松. 现代青藏高原上升速度问题. *科学通报*, 1991, (7): 529~531.
- 27 国家地震局阿尔金活动断裂带课题组. *阿尔金活动断裂带*. 北京:地震出版社, 1992.
- 28 Zeitler P K. Cooling history NW Himalaya. *Tectonics*. 1985, 4: 127~151.
- 29 Xiao Xuchang. Tectonic evolution and uplift of the Himalaya—Tibet Plateau. in Burg J P, Cinzia S C. eds. *10th Himalaya—Karakoram—Tibet Workshop*, 4~8 April, Abstract Volume. ETH- Zürich, Switzerland, 1995. 45.
- 30 Kazunori Arita, Yishihiro Ganzawa, Yoshihide chta, Accelerating uplift since the Miocene and tectonics of the Nepal Himalayas. *10th Himalaya—Karakoram Tibet Workshop, Abstract Volume*. ETH- Zürich, Switzerland, 1995. 11~14.
- 31 刘顺生. 西藏南部地区的裂变径迹年龄和上升速度的研究. *中国科学(B)*. 1987, (9): 1000~1011.
- 32 丁林. 东喜马拉雅构造结上新世以来快速抬升的裂变径迹证据. *科学通报*. 1995, 40(16): 1497~1501.
- 33 Zhao W, Nelson K D & Project INDEPTH Team. Deep seismic reflection evidence for continental underthrusting beneath S. Tibet. *Nature*. 1993, 366: 557~559.

- 34 Zhao W, Nelson K D, Che J K, Brown L D, Xu Z, Kuo J. deep seismic reflection in Himalayan region reveals the complexity of the crust and upper mantle. *Acta Geophysica Sinica*. 1993, 39(5): 615~628.
- 35 Nelson K D, Zhao W, Brown L D, Kuo J, che J K, Liu X, Klempere S L, Makovsky Y, Meissner Y R, Mechie J, Kind R, Wenzel F, Ni J, Nabelek J, chen L, Tan H, Wei W, Jones A G, Booker J, Unsworth M, Kidd W S F, Hauck M, Alsdorf D, Ross A, cogan M, Wu C, Sandvol E, Edwards M. Partially molten middle crust beneath southern Tibet: synthesis of project INDEPTH Results. *Science*. 1993, 274:1684~1688.
- 36 Chen Leshou, Booker J R, Wei Wenbo, Tan Handong. Colliding continents: Electrical conductivity structure of the Asia/India collision. in 30 th IGC Abst. Vol. 1. Beijing: Geological Publishing House, 1996. 196.
- 37 许志琴, 姜枚, 杨经绥. 青藏高原北部隆升的深部构造物理作用. *地质学报*. 1996, 70(3): 195~206.
- 38 沈显杰. 青藏热流和地体构造热演化, *地质矿产部地质专报*, 第 14 号. 北京: 地质出版社, 1992.
- 39 Argand E. La tectonique de l'Asie Proc. 13th Int. Geol. Congr. (7). Brussels, 1924. 171~372.
- 40 Zhao W, Morgan W J. Uplift of Tibetan Plateau. *Tectonics*. 1985, 4 (4): 359~369.
- 41 Willett S D, Christopher Beaumont. Subduction of Asian lithospheric mantle beneath Tibet inferred from models of continental collision. *Nature*. 1994, 369(23): 642~645.

A Brief Review of Tectonic Evolution and Uplift of the Qinghai-Tibet Plateau

Xiao Xuchang and Wang Jun

(*Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, China, 100037*)

Abstract

Recent studies of paleobiogeography, sedimentography and paleomagnetism of the Qinghai-Tibet plateau show that the Indian plate and the terranes of the the Qinghai-Tibet plateau accreted to Eurasia during the Late Paleozoic to Mesozoic did not drift northward across a vast "Tethys ocean". During this period only an epeiric sea, a narrow Tethys sea, rather than a "vast eastward opening Tethys" lay between India and Asia. With the acquisition of the data of geodetic leveling, GPS and fission track, the uplift rates of the Qinghai-Tibet plateau (QTP) have been generalized. The uplift process of the QTP can be divided into three major stages, i. e. the slow uplift stage in the Late Cretaceous—Oligocene, the intermediate uplift stage in the Miocene—Pliocene and the rapid uplift stage in the Pleistocene—Holocene. The uplift rates were increased with time. There are likely two abrupt periods; one is around Late Miocene and the other around Late Pliocene—Pleistocene. Based on the studies of geological and geophysical data, this paper suggests that the causes of the rise of the QTP are complex and heterogeneous, involving many factors. Preliminary synthetic study indicates that the compression from the India terrane and the resistive force (or hysteresis effect) from the rigid blocks (the Tarim and Tangtze terranes), the thermal effects or expansion, and the isostatic adjustment in the late period are the three major factors leading to crustal shortening, thickening and uplifting of the plateau.

Key words: Tethys; evolution and uplift; the Qinghai-Tibet plateau

作者简介

肖序常,男,1929年生,1952年毕业于北京大学地质系。现为中国科学院院士。主要从事中国西部地区构造地质、蛇绿岩等的研究。通讯地址:100037,北京阜外百万庄中国地质科学院地质研究所。