

doi:10.3799/dqkx.2010.086

从青藏高原新生代构造隆升的时空差异性 看青藏高原的扩展与高原形成过程

王国灿^{1,2}, 张克信^{2,3,4}, 曹 凯², 王 岸^{1,2}, 徐亚东², 孟艳宁²

1. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

3. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

4. 中国地质大学地质调查研究院, 湖北武汉 430074

摘要: 在总结青藏高原新生代构造隆升剥露过程时空差异性的基础上, 揭示青藏高原的扩展与高原形成过程。古新世—始新世(65~35 Ma)为受逆冲推覆作用控制不同层次的岩石抬升剥露, 蚀源区主要位于甜水海、祁连山、松潘—甘孜—巴颜喀拉和冈底斯等地区; 羌塘—可可西里—柴达木以及西宁—临夏地区为低海拔冲泛平原区; 西北部和南部地区保持为残留海沉积区。渐新世晚期—中新世早期(25~17 Ma)藏南地区(冈底斯及北喜马拉雅)强逆冲推覆导致地壳强烈加厚, 在其后约17~12 Ma间因均衡作用而获得现在的地表高海拔; 腹地的羌塘—可可西里主体为前陆盆地发育期; 北缘边缘山系现代盆—山地地貌格局雏形形成。中新世中晚期(13~7 Ma)以冈底斯—北喜马拉雅高海拔的原始高原为核心, 高原向北扩展。高原腹地羌塘—可可西里地区盆地发生区域性的抬升, 并达到相当高的海拔高度; 北缘系列山脉进一步崛起于盆地之上, 现代盆—山地地貌格局基本形成。上新世以来高原以冈底斯—北喜马拉雅为核心快速向北扩展; 腹地的羌塘—可可西里—松潘—甘孜广大地区发生整体地表抬升达到现今海拔高度; 北缘系列山脉加剧抬升, 并向盆地方向扩展, 在平均海拔增大的基础上, 地貌反差也加剧; 南部喜马拉雅地区在逆冲和气候的双重控制下, 地貌反差加剧, 系列大于7 000 m的异常高海拔山体形成。

关键词: 青藏高原; 构造隆升; 地表抬升; 高原扩展。

中图分类号: P534.6; P542

文章编号: 1000-2383(2010)05-0713-15

收稿日期: 2010-05-31

Expanding Processes of the Qinghai-Tibet Plateau during Cenozoic: An Insight from Spatio-Temporal Difference of Uplift

WANG Guo-can^{1,2}, ZHANG Ke-xin^{2,3,4}, CAO Kai², WANG An^{1,2}, XU Ya-dong², MENG Yan-ning²

1. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

4. Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: In this paper we deduce the expanding and forming processes of the Qinghai-Tibet plateau by summarizing the spatio-temporal difference of uplift during Cenozoic. The uplift in the Paleocene-Eocene(65—35 Ma) mainly showed rock uplift driven by thrusting in different crust levels. The major denudation areas included the Tianshuihai, the Qilian Shan, Songpan-Ganzi-Bayan Har and Gangdise etc. There appeared alluvial-pluvial plain with low elevation in the Qiangtang-Hoh Xil-Qaidam and Xining-Linxia areas, and maritime space in the western Kunlun and Himalaya areas. In the Late Oligocene-Early Miocene (25—17 Ma), intensive thrusting induced increased crust thickness in the southern Tibet (including the Gangdese and the northern Himalayan belt). Then in about 17—12 Ma, crust isostatic compensation drove the southern Tibet to reach the current high elevation. Foreland basin developed in the Qiangtang-Hoh Xil area, and basin-range relief emerged in the northern margin of the Qinghai-Tibet plateau during the late Oligocene-early Miocene. In the middle-late Miocene (13—7 Ma), centering in the

基金项目: 中国地质调查局项目(No. 1212010610103); 国家自然科学基金项目(Nos. 40902060, 40672137, 40921062).

作者简介: 王国灿(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事造山带地质、构造年代及构造地貌研究. E-mail: wgcan@cug.edu.cn

southern Tibet (the Gangdise-northern Himalayan belt), the plateau grew and expanded northwardly. The basin in the Qiangtang-Hoh Xil area uplifted regionally and reached quite high altitude. In the northern margin of the Qinghai-Tibet plateau, a series of mountains ulteriorly popped up to the basin. The modern basin-range relief formed by and large but still kept lower average attitude. Since Pliocene, the plateau has been expanding northward rapidly. Rapid unitary surface uplift has been happening in the vast area of the Qiangtang-Hoh Xil-Songpan-Garzê-Bayan Har, forming the hinterland of the current plateau. In the northern edge of the plateau, the series of mountains also have been acutely uplifting and expanding forward adjacent basin, and average attitude has also been going up. In the Himalaya, the southern edge of the plateau, the relief contrast has been strengthening by thrusting and eroding. A series of high mountains finalize, with super-elevation of more than 7 000 m, such as the Qomolangma.

Key words: Qinghai-Tibet plateau; tectonic uplift; surface uplift; plateau expanding.

青藏高原作为高海拔高原扩展和形成过程是引人关注的重大科学问题之一。不断积累的大量低温热年代学资料、沉积构造古地理资料、古生物—古气候资料以及与高原隆升有关的稳定同位素等资料揭示了青藏高原新生代构造隆升具有明显的时空差异性。本文基于青藏高原新生代构造隆升时空的差异性,从地表抬升的角度试图对青藏高原的扩展与高原形成过程作出分析。

1 青藏高原新生代构造隆升的时空差异

笔者在综合青藏高原不同部位热年代学资料的基础上,划分出 65~35 Ma(古新世—始新世)、25~17 Ma(渐新世晚期—中新世早期)、13~7 Ma(藏南 18~13)(中新世中晚期)和大约 5 Ma 以来 4 个主要强构造隆升剥露阶段,揭示青藏高原不同地区主要强构造隆升剥露阶段具有准同时性(另文发表)。但是在青藏高原这种准同时构造隆升的基本框架下,其隆升时空演化也呈现出明显的差异性。

1.1 古新世—始新世(65~35 Ma)

青藏高原新生代地质作用过程以印度板块和欧亚板块的碰撞拉开帷幕。碰撞及碰撞后的持续挤压引起青藏高原地域广泛的岩石抬升剥露。从低温热年代学资料的分布来看,古新世—始新世阶段的强构造抬升区较为有限,主要分布于冈底斯、北喜马拉雅构造带、雅江大拐弯地区、甜水海、阿尔金山北部的拉配泉—红柳沟、柴达木北缘的祁连山和高原东北缘的东昆仑东段及黄河源地区。

北喜马拉雅构造带和雅鲁藏布江大拐弯地区构造抬升主要为受深层次逆冲堆垛控制下的岩石抬升冷却(Zeitler, 1985; Schlup *et al.*, 2003; 张进江等, 2003; 许志琴等, 2008),地表并没有呈现出明显的剥蚀区。这一时期沿雅江一线及其以南的北喜马拉雅

构造带主体仍保持着海相沉积,属新特提斯残留海的一部分(万晓樵, 1990; 赵政璋等, 2001; 李国彪等, 2002; 丁林, 2003)。

西昆仑地区从西昆仑山喀什群的滨浅海碎屑岩—碳酸盐岩沉积过渡到北侧塔西南的碳酸盐岩台地沉积的岩相分布格局说明古新世—始新世时期的蚀源区位于南部(邵龙义等, 2006)。笔者对西昆仑山前上新世以来的碎屑沉积岩和现代河流碎屑沉积沙进行碎屑锆石和磷灰石裂变径迹年龄分析,揭示了 60~65 Ma 和 35~45 Ma 两次在西昆仑基岩裂变径迹年龄未能反映的古近纪强构造抬升剥露期。由于古近纪时期西昆仑主体仍是海湾,因此,碎屑裂变径迹年龄揭示的 60~65 Ma 和 35~45 Ma 两期强抬升剥露事件应该反映的是康西瓦断裂以南的甜水海地体蚀源区的两次强抬升剥露,与这一时期的构造地貌吻合。

冈底斯地区在古新世—始新世时期作为欧亚板块与印度板块碰撞前缘,向印度板块发生强仰冲抬升,这一强构造抬升剥露期主要体现为沿大型主干断裂的强逆冲活动导致的逆冲抬升。吴珍汉等(2004)1:25 万区域地质调查新厘定的纳木错逆冲推覆构造在约 44 Ma 存在一次强构造活动,并引起岩石抬升冷却。在强逆冲活动控制下,冈底斯带继承原作为岛弧的高地形地貌成为主要的强构造抬升剥露带,对北侧羌塘—可可西里地区广泛的陆相盆地发育起着明显控制作用。

东昆仑东部的黄河源地区及以南的松潘—甘孜地区缺失古新统一始新统沉积,为古隆起剥蚀区。东昆仑东部的黄河源地区的低温热年代学资料揭示了古新世—始新世为强烈的抬升剥露期,系列向北的逆冲推覆控制了东北部系列古近纪盆地发育。方小敏等(2007)根据西宁、贵德盆地地层和盆地演化记录认为,在古近纪时期,分隔贵德盆地和西宁盆地的拉脊山并不存在,两者实为统一盆地;并认为此时盆

地的发育是受昆仑山前断裂逆冲活动控制的山前挠曲盆地或陆内前陆盆地。裂变径迹年代学所呈现的古新世—渐新世并不表现出明显的岩石抬升,但这一时期其作为古剥蚀区长期存在,并为东侧的成都平原和西侧的羌塘—可可西里冲泛平原提供物源。由于其内部差异构造活动并不明显,因此东部成都平原的古新世—渐新世沉积也保持着较稳定的细碎屑沉积特点。

东昆仑中西段缺乏古新世—始新世期间强构造抬升剥露的热年代学记录,即剥露作用不明显,北部柴达木盆地的路乐河组($E_{1-2}l$)为一套粗碎屑河流相砂砾岩沉积,与可可西里盆地的沱沱河组具有类似特点。尹安等(2007)通过系列横跨柴达木盆地的区域地震剖面解释认为柴南缘逆冲断层系到 35.5~23.3 Ma 间才对柴达木盆地的沉积及褶皱变形起控制作用。控制柴达木盆地古新世—始新世沉积的物源区应在柴北或西北缘,低温热年代学研究揭示阿尔金南侧的柴达木盆地北部地区在古新世—始新世时期有快速的抬升剥露;尹安等(2007)发现路乐河组($E_{1-2}l$)沉积和褶皱变形受北侧柴北缘逆冲断层系所控制,盆地新生代地层褶皱首先在柴西贴近阿尔金断裂附近形成(65~50.5 Ma),并向柴东扩展(23.3 Ma)。这些资料说明,现今分隔可可西里盆地与柴达木盆地之间的东昆仑中西段可能并不存在。

青藏高原腹地羌塘—可可西里地区在古新世—始新世主体为陆相盆地沉积区。盆地的南部边界为班公湖—怒江断裂。在这一广大区域内也存在一些受断裂控制的抬升剥露区,如唐古拉山的 25 件磷灰石裂变径迹年龄测试揭示了始于大约 60 Ma 并一直延续到 40 Ma 的快速冷却剥露事件(Wang C. S., *et al.*, 2008)。盆地的北边界不十分明显,东昆仑中西段此时可能并没有成型,可可西里盆地可能和柴达木盆地连通,因此北边界应该为柴达木盆地北部边缘断裂;而东部由于松潘—甘孜—巴颜喀拉地区为蚀源区,边界大体应为玉树—金沙江断裂。

1.2 渐新世晚期—中新世早期(25~17 Ma)

这一强构造抬升期影响范围广、强度大,在构造地貌上发生了较大变革,在沉积方面有明显响应。西部地区甜水海蚀源区向北扩展到西昆仑地区,控制着北侧塔西南前陆盆地的发育。在此期间山前盆地由渐新世巴什布拉克到中新世的克孜诺依组沉积粒度明显变粗,陆缘碎屑逐渐增多并最终在中新世转为陆相滨湖—浅湖沉积,具有明显的挤压环境下前陆盆地沉积充填序列特征。

藏南喜马拉雅山地区以主中央逆冲断层为代表的系列向南逆冲推覆作用(潘桂棠等,1990; Parrish and Hodges, 1993; Coleman and Hodges, 1995; Harris, 1995; Coleman, 1998)控制着喜马拉雅南部山前恒河平原的沉积体系转换。与北部西昆仑山前类似,喜马拉雅南部山前沉积在这一强构造隆升阶段同样表现出由海相向陆相的沉积转化,并在约 18.3 Ma 最终为西瓦里克前陆凹陷的形成奠定了基础(钟大赉和丁林,1996)。

冈底斯带在渐新世—中新世之交发生了强构造抬升剥露。南侧控制了沿雅江分布的大竹卡组粗碎屑沉积,北侧控制了羌塘地区的以康托组(E_3N_1k)为代表的前陆盆地发育。南侧伴随喜马拉雅山系的形成以及冈底斯南缘断裂向南的仰冲,形成了现今的雅鲁藏布江谷地雏形(王二七等,2002),沿谷地发育大竹卡组洪冲积相砂砾岩沉积。北侧康托组(E_3N_1k)为代表的沉积盆地的南界为班公湖—怒江断裂,北抵羌塘腹地黑虎岭一带。下部为洪冲积相砂砾岩,上部演变为湖相砂岩、粉砂岩、泥岩含石膏。沉积厚度南部达 1 400 余米,向北变薄至 300~400 m,表现为受班公湖—怒江断裂控制的前陆盆地沉积特点。

东昆仑中西部发生构造抬升剥露,构造差异加剧,向受逆冲推覆控制的东昆仑山突起并开始分割北侧柴达木盆地和南侧可可西里盆地的方向发展。其中,南部的可可西里地区及通天河地区此时受构造挤压导致古近纪沱沱河组(56~32 Ma)—雅西错组(32~30 Ma)为代表的沉积盆地消亡,并广泛褶皱冲断,造成近水平产出的五道梁组(23~16 Ma)地层与下伏地层之间的广泛区域角度不整合接触关系,而北侧柴达木盆地承袭前一阶段的盆地演化连续接受沉积。

高原东北缘地区在大约 23~21 Ma 由于强烈的挤压变形,拉脊山作为独立山系开始显现,成为分割西宁—兰州盆地与南部的贵德—循化盆地的屏障(方小敏等,2007)。此外,祁连山这一阶段向北的挤压导致北部酒泉—张掖盆地的沉积间断,渐新世白杨河组(E_3by)之后整个中新统缺失沉积。

高原东缘的低温热年代学记录了川滇西部地区 25~17 Ma 存在的强烈构造抬升事件(来庆洲等,2006),响应这一强构造挤压抬升的东部四川盆地和川滇地区在古近纪—新近纪之交表现为明显的区域性沉积间断和角度不整合。

1.3 中新世中晚期(13~7 Ma)

13~7 Ma 间的中新世中晚期是青藏高原边缘

和内部系列断裂构造活动时期,形成系列由断裂控制的断陷盆地.这一阶段,青藏高原的构造分异渐趋明显,不同部位断裂构造活动的特点不同,从而形成了不同类型的断陷.

青藏高原南部地区的构造隆升在区域上并不强烈,实际上是前一阶段隆升演化的延续,有其独特性.在 25~17 Ma 间由于藏南地区主中央逆冲断层、冈底斯南缘断裂、班公湖—怒江断裂等一系逆冲推覆作用,引起藏南冈底斯—喜马拉雅地区地壳厚度强烈加厚,伴随地壳加厚发生部分熔融形成了藏南地区的淡色花岗岩系.到 17~16 Ma 左右地壳加厚到一定程度后,由于重力的不稳定而在原逆冲剪切带基础上,发生构造反转引发藏南拆离系的形成,并进一步导致高喜马拉雅结晶岩系的剥露,大约 13~12 Ma 藏南拆离系停止活动时,藏南地区的地表抬升已经获得现在的地表高海拔.因此,中新世中晚期(13~7 Ma),藏南地区(包括冈底斯和北喜马拉雅地区)对构造隆升的沉积响应主要表现为在已经获得最大的高海拔基础上,系列近南北向的裂陷盆地和少量平行造山带方向的断陷盆地的发育和扩展.代表性的近南北向裂陷盆地系统包括木斯塘盆地、普兰盆地、吉隆盆地和羊八井—当雄盆地等;平行造山带方向的盆地,如札达盆地等.因此,这一阶段的岩石抬升主要表现为系列张性断陷所导致的下盘基岩的快速抬升,如羊八井—当雄断陷导致的下盘念青唐古拉山的抬升剥露(Harrison *et al.*, 1995; 吴珍汉等, 2005).藏南冈底斯—北喜马拉雅地区这些小型但具有特殊意义的断陷盆地,特别是近南北向断陷盆地的出现,标志着青藏高原进入一个新的构造阶段,即从近南北向的地壳收缩加厚转为近东西向的扩展或向东蠕散.

青藏高原腹地羌塘—可可西里地区,西部中新世中晚期的构造抬升导致以康托组(E_3N_1k)为代表的沉积盆地抬升,形成中新世晚期—上新世的喇叭湖组(N_s)与康托组(E_3N_1k)之间的区域性的角度不整合关系;东部以五道梁组(N_1w)为代表的盆地也发生区域性抬升而缺失中新世晚期沉积.

高原东北缘地区的构造抬升主要发生在约 8 Ma(宋春晖等, 2001; 张培震等, 2006; 方小敏等, 2007; 袁道阳等, 2007),主要表现为高原向东北方向的扩展,如拉脊山作为单一山体加速抬升,边缘断裂向盆地快速扩展,控制南部贵德盆地沉积.从约 8 Ma 开始迅速从湖相转变为盆地边缘的山麓洪积相和盆地中央的辫状河流相(方小敏等, 2007),细砾

岩出现,并逐步向盆地中央扩展,沉积速率开始明显增加.祁连山向北的挤压导致北部酒泉—张掖盆地扇三角洲砾岩大规模频繁沉积, 8.26~8.23 Ma 沉积速率由前期的 $0.16 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$ 突然增至 $0.3 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,反映了祁连山海拔增高,地貌反差增大(宋春晖等, 2001).

藏东和川滇西部地区 13~9 Ma 的快速抬升剥露的裂变径迹年代学记录广泛出现在藏东大渡河、安宁河、雅砻江深切峡谷(Clark *et al.*, 2005)、川西龙门山、贡嘎山(来庆洲等, 2006; 张毅等, 2006)、藏东察隅(丁林等, 1995)和滇西高黎贡山(王刚等, 2006)等地,反映 13~9 Ma 的快速抬升剥露事件具有广泛的影响.响应中新世中晚期(13~7 Ma)强构造隆升的沉积作用主要表现为系列走滑断裂活动控制的拉分盆地发育,以较粗的碎屑沉积为主;东部成都盆地响应青藏高原东缘的逆冲扩展,发育总体向上变粗的层序.在该构造阶段晚期,包括成都盆地在内的藏东和川滇西部诸多盆地均表现强的抬升消亡而缺失沉积.

西北地区包括阿尔金和西昆仑均表现出受断层控制的强构造抬升剥露,西昆仑主要表现为向北的系列逆冲断片抬升(王彦斌等, 2001; Wang *et al.*, 2003),阿尔金地区则表现为受阿尔金断裂的左旋走滑活动形成“正花状”构造伴随的强烈差异抬升剥露(刘俊来等, 2003).相关的沉积作用在柴达木和塔里木盆地南缘均有明显响应,主要表现为向上的粒度变粗,沉积速率加快.在塔西南表现为安居安组(N_1a)泥岩粉砂岩向帕尔布拉克组(N_1p)砾岩砂岩的沉积过渡;柴达木盆地表现为从上油沙山组泥岩粉砂岩(N_1y)向狮子沟组($N_{1-2}s$)砾岩的过渡.

1.4 上新世以来(5 或 3.6 Ma 以来)

上新世以来是青藏高原加速抬升剥露期,在青藏高原不同部位均有显著表现.在西昆仑地区 5 Ma 以来的快速抬升剥露区主要集中在靠近帕米尔构造结的公格尔—塔什库尔干地区(Arnaud *et al.*, 1993; 王军, 1998),和靠近西昆仑构造带与阿尔金构造带的转换交接部位,反映 5 Ma 以来的强隆升剥露与基处于西昆仑东西两端构造结的强应变集中区有关.在阿尔金地区主要表现在阿尔金断裂带中部的阿羌地区,该处的磷灰石裂变径迹测年结果显示,靠近阿尔金主断裂山体在新近纪晚期(5.15~4.15 Ma)和第四纪早期(2.11~1.18 Ma)都发生了快速剥露作用(陈正乐等, 2006),表明了阿尔金断裂在新近纪和第四纪早期都发生了快速走滑作用,同

时伴随着断裂带旁侧山体的快速隆升剥露,包括祁连、东昆仑和黄河源的青藏高原东北缘地区自 3.6 Ma 以来呈现出受系列近东西向逆冲和走滑断层控制的强烈的地表抬升,并呈加剧趋势(宋春晖等,2001;张培震等,2006;方小敏等,2007;袁道阳等,2007)。但是总体上的区域剥蚀量相对较小,主要表现为系列山系加剧地表抬升,东昆仑山、祁连山、拉脊山等急剧快速的隆升和断裂强烈地向盆地扩展,地貌反差加大,高原面向北东方向扩展。藏东和川滇西部的青藏高原东缘地区的低温热年代学资料记录的 5 Ma 以来的快速抬升剥露也十分广泛,为强抬升剥露冷却期(丁林等,1995;Clark *et al.*, 2005;来庆洲等,2006;王刚等,2006;向宏发等,2006;张毅等,2006);藏南地区高喜马拉雅构造带的喜马拉雅南坡大量的磷灰石和锆石裂变径迹年代记录揭示 3 Ma 以来的强抬升剥露,具有异常高的剥露冷却速率,并且往南剥蚀速率趋于增大;系统对比沿喜马拉雅山的裂变径迹年龄资料可以看出,最年轻的裂变径迹年龄和最大的剥露速率分布于东、西构造结和中喜马拉雅珠峰—希夏邦马峰 3 个中心(Sorkhabi *et al.*, 1996;Burbank *et al.*, 2003;Thiede *et al.*, 2004;Vannay *et al.*, 2004;Grujic *et al.*, 2006),与现今大于 8 000 m 的异常高峰分布相吻合。这种空间差异性反映了晚近地质时期的气候变化引起的降雨量的增大与构造作用联合控制了喜马拉雅山的抬升剥露和现今的地貌格局。此外,冈底斯构造带也有约 5 Ma 以来强构造抬升剥露的裂变径迹年龄记录(袁万明等,2001),而其北部的羌塘—可可西里地区可能主要表现为地表抬升,大幅度的岩石剥露并不十分明显。

上新世特别是 3.6 Ma 以来青藏高原周缘及内部系列沉积盆地响应整个青藏高原的快速构造抬升事件,普遍表现出粗砾石层堆积,沉积速率明显加快。特别是青藏高原周缘出现大体可对比的扇砾岩堆积,如西昆仑山北缘的西域砾岩、祁连山北麓的玉门砾岩、东缘龙门山前的大邑砾岩、东北缘的积石砾岩及南缘西瓦里克群的明显变粗呈砾岩堆积等。高原内部系列盆地碎屑沉积也明显变粗出现砾岩堆积,如吉隆盆地的贡巴砾岩、冈底斯构造带上的布隆组砾岩等。这些时代可大体对比的扇砾岩的出现指示了青藏高原快速向周缘扩展和地表抬升,现代高原地貌最终定型。

需要指出,上新世以来是东亚季风增强并引起青藏高原周缘降水增强以及全球气候变冷、冰川作

用盛行时期,这些大气过程在时间上正好与青藏高原周缘粗砾石层堆积和沉积速率明显加快的时间相吻合,据此,气候引起剥蚀速率增强并进而影响到沉积速率增加和粒度变粗的观点引起了广泛关注,有人认为青藏高原周缘上新世以来大体可以对比的粗碎屑堆积主要是气候作用的产物,而并非是构造引起的青藏高原快速抬升结果(Molnar and England, 1990; Zhang *et al.*, 2001; Molnar, 2004; Huntington *et al.*, 2006)。然而,更多的研究则揭示,造山带的隆升剥露是构造—气候相互耦合作用的综合结果(Willett, 1999; Whipple and Tucker, 1999; Beaumont *et al.*, 2001),在一定时间尺度和一定空间尺度内,气候通过剥蚀作用会导致岩石的抬升剥露,但是,一个长时间尺度和大空间范围内的强抬升剥露期主要还是受地球内部的构造动力因素所控制,尽管期间气候因素会加剧这一过程(陈杰等, 2007; Thiede *et al.*, 2009)。青藏高原上新世以来构造活动加剧、抬升强度加剧、沉积粒度变粗以及沉积速率加大彼此耦合的事实说明这一阶段的抬升主体还是受构造作用主导(Godard *et al.*, 2006; 陈杰等, 2007; Thiede *et al.*, 2009),构造作用通过地表隆升和地势增高影响气候特征,甚至改变大尺度上的气候格局。季风增强和侵蚀速率的增加又进一步促进和加剧青藏高原构造抬升的进程。

2 青藏高原扩展与高原形成

青藏高原何时形成、何时达到现代高海拔高程、是差异抬升还是整体抬升? 这些问题一直是研究青藏高原的地质学家们关注的焦点问题。许多中国学者根据对青藏周边地区晚新生代古植物化石、古动物化石、古岩溶、古夷平面、沉积相(如标志山地上升的扇砾岩为主的内陆磨拉石沉积)、古土壤、古气候等方面的综合研究,认为高原整体快速隆升达到现代海拔高度的时间主要发生在 3.6 Ma 以来(钟大赉和丁林,1996;李吉均和方小敏,1998;施雅风等,1999;李吉均等,2001);而以 Harrison 等为代表的国外学者则主要根据控制近南北向地堑正断层的形成时间、推测为岩石圈拆沉引发的幔源火山岩活动时间或根据与伸展相关的火山岩的活动时间以及具有古海拔高度指示意义的古植物和沉积物稳定同位素研究等证据,强调高原早在 8 Ma 以前甚至更老就已经达到现代的海拔高度(Molnar *et al.*, 1993;

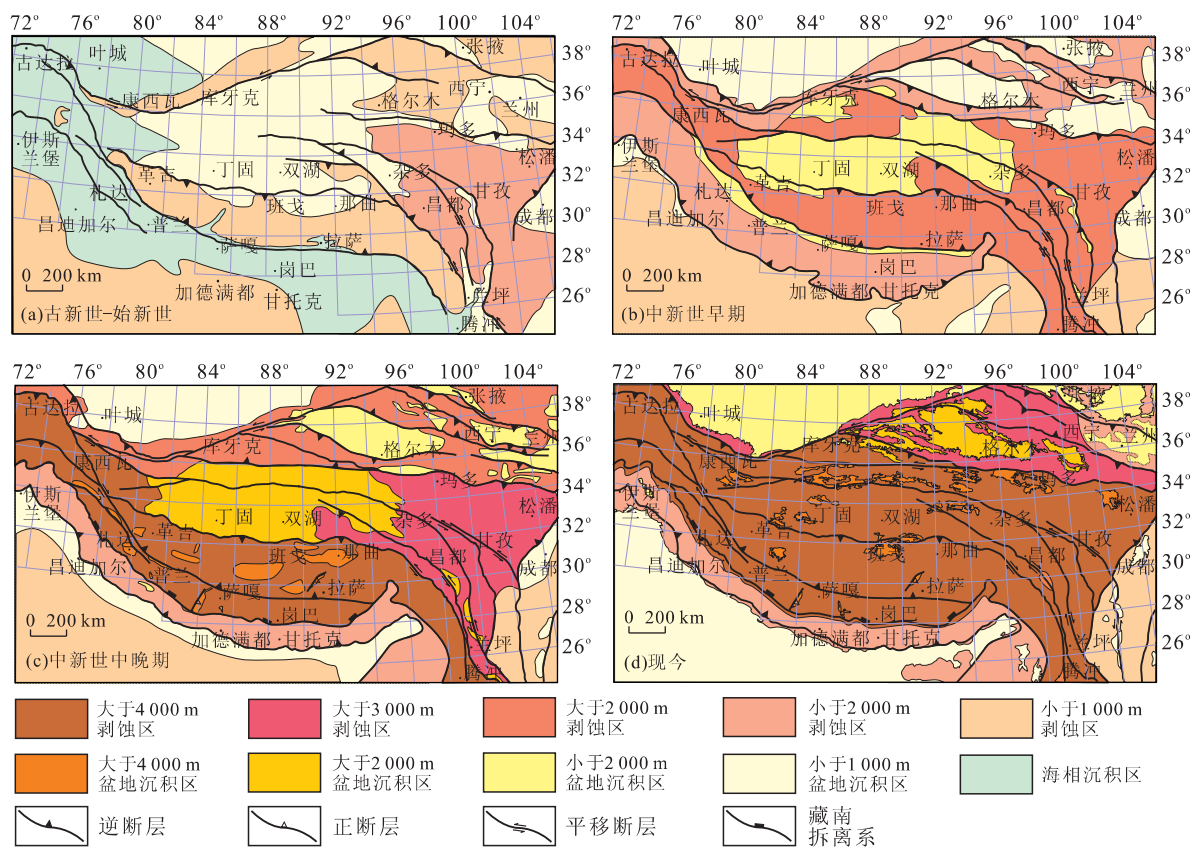


图 1 新生代青藏高原扩展过程示意

Fig. 1 Sketch map showing the expanding processes of the Tibetan plateau during Cenozoic

Coleman and Hodges, 1995; Harrison *et al.*, 1995; Chung *et al.*, 1998; Williams *et al.*, 2001; Spicer *et al.*, 2003; Rowley and Currie, 2006). 无论是国内还是国外学者,总是习惯于将一些局部的、片段的高海拔证据推广到整个青藏高原,即将一些局部地区的高海拔看成整个青藏高原均达到了高海拔,强调的是青藏高原整体地表抬升。近年来的研究说明,青藏高原高海拔获得存在时空差异性,高原的形成是随时间演变不断扩展的过程 (Tapponnier *et al.*, 2001; Wang C. S. *et al.*, 2008). 这里,笔者综合最近几年的新资料,对青藏高原分阶段、分区域的扩展过程作一总结分析(图 1)。

2.1 前新生代

青藏高原最早的抬升区域位于北部。印支晚期古特提斯洋盆的关闭导致了青藏高原的最大海退期,侏罗纪—白垩纪,阿尔金断裂以东、羌塘以北广大区域转为陆地。据有关研究,阿尔金断裂在印支期(220~240 Ma)已经形成并出现高温韧性走滑活动(李海兵等,2001,李海兵和杨经绥,2004),东部的龙门山褶皱带及向东的逆冲推覆在晚三叠世—早白垩

世形成(Burchfiel *et al.*, 1992; Chen and Wilson, 1996)。因此,青藏高原北部和东部边界的雏形在印支晚期—燕山早期已经显现,但并不十分明显。白垩纪时期,随着中特提斯洋沿班公湖—怒江一线缝合,冈底斯微陆块沿班公湖—怒江一线俯冲到北部高原之下,北部受塔里木—阿拉善地块的阻挡,阿尔金断裂的活动更趋明显,在左行走滑过程中,在 120 Ma (白垩纪)左右开始伴随相对的快速隆升作用,但这一时期阿尔金的构造古地理面貌并不明晰。起转换作用的祁连山北缘逆冲断层开始活动,控制了早期祁连山脉的形成。往南到东昆仑和松潘—甘孜—巴颜喀拉广大地区,白垩纪沉积普遍缺失,且广大区域内均有早白垩纪构造热事件的记录(Liu *et al.*, 2005,王国灿等,2007),显示一次区域性的构造抬升;东部的龙门山地区,受扬子板块阻挡,发育一系列逆冲推覆构造及同时代与陆内俯冲有关的大量白垩纪花岗岩的侵位,龙门山褶皱带进一步隆起,因此到早白垩世,青藏高原北部“高原”雏形在班公湖—怒江北部的广大地区基本形成(李海兵和杨经绥,2004)。这一时期“高原”雏形地势反差可能并不大,海

拔也不高,并不具备“高原”特性,但是这一雏形“高原”为新生代构造隆升和变形聚变期的准同时性的应力快速传递和高原抬升的区域效应奠定了基础。

2.2 古新世—始新世

新生代早期古新世—始新世,印度板块与欧亚板块碰撞并持续挤压,影响了青藏高原广大范围内的构造抬升。此时中生代时期“高原”雏形的地貌格局发生分化。

东北部的隆起蚀源区主要位于松潘—甘孜—巴颜喀拉一带,为东昆仑山北缘断裂、金沙江—红河断裂和龙门山断层所夹持的三角形地区。羌塘—可可西里—柴达木地区主体表现为大面积的冲泛平原—湖盆沉积区(Zhang *et al.*, 2008)。受阿尔金走滑断裂向北东和南西方向的扩展和祁连山向南、北两侧的系列逆冲推覆构造体系的影响,阿尔金—祁连山地区为另一隆起蚀源区,其中祁连山的隆升控制了北部河西走廊盆地最老新生代陆相地层的沉积(戴霜等, 2005)和南部柴达木盆地陆相地层的发育。西部西昆仑地区此时主体仍为海域,热年代学资料揭示在康西瓦断裂以南的甜水海地区应存在线状隆起蚀源区。南部地区雅江以南在古新世—渐新世仍是俯冲板块,海域直至始新世末退却,而雅江以北的冈底斯地区作为印度板块与欧亚板块相互作用的前锋仰冲板片发生强烈的地表抬升并遭受剥蚀,构造抬升受向南逆冲的雅江断裂(或冈底斯南缘逆冲断层)和北侧向北的班公湖—怒江断层(Wang G. C., *et al.*, 2008)等控制,呈现出挤压背冲式抬升。在这种构造体制控制下,冈底斯可能获得一定的海拔高度。最近,有不少研究提出始新世时期冈底斯甚至包括羌塘地区已经出现类似现在海拔的“原始高原”,例如 Rowley and Currie(2006)根据班公湖—怒江缝合带附近安多西侧的伦布拉盆地(Lunpola basin)沉积的氧同位素研究认为,到始新世末期,这一地区海拔已超过 4 km; DeCelles *et al.* (2007)通过对沿班公湖—怒江缝合带分布的尼玛盆地(Nima basin)沉积物的稳定同位素的研究也得到类似结论,认为到早渐新世这一地区高而干旱,类似现代环境; Wang C. S., *et al.* (2008)对可可西里盆地沱沱河组($E_{1-2}t$)进行磁性地层学研究结果表明,在 55~40 Ma 间平均沉积速率约 150 m/Ma,在约 40 Ma 左右沉积速率明显增加到 1 500 m/Ma,随后又从 39~30 Ma 减小到平均 400 m/Ma,其中 40 Ma 左右的明显加速沉积和向上变粗的卵石沉积相协调,也和唐古拉山裂变径迹所反映的快速抬升剥露期相协调。

据此, Wang C. S., *et al.* (2008)将可可西里盆地解释为受唐古拉逆冲推覆系统活动控制的前陆盆地堆积,并进而认为南部的冈底斯地体与羌塘地体是统一的构造抬升体。结合 Ar-Ar 测年发现羌塘地区出现始新世富钾花岗岩,从而认为在约 40 Ma 前冈底斯—唐古拉已经形成与现今海拔相当的原始高原。应该说,稳定同位素古高度的影响因素十分复杂(Blisniuk and Stern, 2005; Kohn and Dettman, 2007; Rowley, 2007),有效性仍然存有争议(Molnar *et al.*, 2006), Wang C. S., *et al.* (2008)提出的冈底斯地体—羌塘地区在 40 Ma 已经达到或接近现代高海拔的依据也并不十分充分。相反,从整体沉积盆地分布格局来看,古新世—始新世时期,羌塘与可可西里均属于较大型的冲泛平原区(张克信等, 2007),南部冈底斯地体的西段阿里地区沉积记录总体还呈现为近海特征,多处还出现海泛海相层沉积(潘桂棠等, 1990),中段仲巴县西北麦拉山地区在一套砾岩层的上部以及念青唐古拉西段的林周等地也都曾发现始新世海相灰岩夹层(章炳高和穆西南, 1979; 钱定宇, 1985; 肖劲东, 1988)。因此,尽管冈底斯地体此时总体为相对较高的剥蚀区,但总体海拔不应太高,更不具备现代的高海拔。抬升剥露区的范围也是值得讨论的问题。Wang C. S., *et al.* (2008)强调冈底斯与羌塘整体构成其原始高原的范围,强调以唐古拉山北侧逆冲断层系统为界冈底斯—羌塘作为统一的抬升体对北部可可西里盆地沉积起着控制作用。然而,古新世—始新世时期盆地沉积实际已经向南跨越唐古拉断裂至羌塘甚至冈底斯构造带上,并且古新世—始新世沉积在羌塘—可可西里地区具有广泛的可对比性。唐古拉断裂南侧代表性沉积牛葆组($E_{1-2}n$)与北侧代表性沉积沱沱河组($E_{1-2}t$)沉积特征十分相似,均表现为下部的粗粒辫状河三角洲砂砾岩沉积发展到上部的细粒湖相砂泥岩沉积。而相比唐古拉断裂对北侧可可西里盆地的控制而言,分隔冈底斯地体与羌塘地体的班公湖—怒江断裂及其所控制的南侧冈底斯地体的构造抬升对北侧盆地具有更重要的控制作用,班公湖—怒江断裂基本构成北侧新生代沉积盆地的南部边界,南部冈底斯地体主要表现为古近纪火山岩分布,而新生代大规模盆地堆积主要分布于班公湖—怒江断裂及其以北广大地区,特别是班公湖—怒江断裂构造带,对渐新世—中新世以康托组(E_3N_1k)磨拉石堆积为代表的盆地堆积具有十分明显的控制作用。因此,尽管古新世羌塘的唐古拉山地区出现有抬升剥露,但总

体北部沉积盆地的南部边界应该为班公湖—怒江断裂,而不应是唐古拉断裂,即古新世—始新世时期冈底斯与羌塘不能构成一个整体的构造抬升体。

综上所述,始新世末期,青藏高原的地表轮廓可概括为以下台阶式结构(图 1a)。一级台阶主要包括青藏高原东部的松潘—甘孜—巴颜喀拉地区,可能为低缓的剥蚀区;二级台阶主要包括冈底斯地区(向西可能和甜水海剥蚀区相连)以及北部的祁连山地区,总体为近海低海拔剥蚀区;三级台阶包括羌塘—可可西里—柴达木以及西宁—临夏地区,为低海拔冲泛平原区;四级台阶为喜马拉雅地区以及西昆仑地区,仍保持为残留海沉积区。从古地理格局来看,地形总体表现出东高西低的面貌。

2.3 渐新世—中新世早期

渐新世—中新世早期,在近南北向挤压应力作用下,以冈底斯地区(向西与甜水海隆起区相连)为核心发生向南和向北的逆冲,地表强烈抬升并向南和向北扩展,此时的冈底斯剥蚀区与松潘—甘孜—巴颜喀拉剥蚀区可能大体处于相同的古海拔(图 1b)。羌塘—可可西里地区可能也已抬升到相当高度。笔者在进行 1:25 万不冻泉幅区域地质调查过程中,对渐新世雅西错组和中新世五道梁组进行植硅体化石研究,揭示可可西里盆地从雅西措组顶部的炎热环境发展到五道梁组底部的极端寒冷环境,反映渐新世晚期—中新世早期之间(30~23 Ma)的一次快速降温事件,对应于高原的抬升和向北扩展;东昆仑山在背冲式逆冲推覆作用的控制下开始抬升,并成为分割可可西里盆地与柴达木盆地的屏障(尹安等,2007)。阿尔金地区由于阿尔金断裂继续向东北扩展,形成阿尔金山雏形,祁连山地区系列逆冲断层继续强烈活动,仍作为青藏高原北缘的隆起剥蚀区。但是到中新世早期,东昆仑以北地区的海拔并不高。东北缘的拉脊山虽然已经出现雏形,但是山体海拔并不高。南部喜马拉雅构造带以主,中央断裂带为代表的系列向南的逆冲推覆构造强烈活动,地壳强烈加厚,喜马拉雅山脉开始显现,代表高原向南的扩展,但当时山体可能也不高,其与冈底斯之间的雅江谷地开始形成。

综上所述,中新世早期青藏高原的地表轮廓可概括为以下台阶式结构。一级台阶包括甜水海—冈底斯—松潘—甘孜—巴颜喀拉广大地区,海拔高度不十分明朗,但应具有一定高度;二级台阶主要包括青藏高原腹地的羌塘—可可西里以及以南的喜马拉雅地区;三级台阶主要包括青藏高原北缘的阿尔金—祁连—东昆仑—拉脊山地区,现代盆—山地貌格

局雏形形成,但平均海拔高度低;四级台阶应位于西昆仑地区,以滨湖—浅湖环境为主。

2.4 中新世中晚期

中新世中晚期藏南地区发生明显的地表抬升,并在 15 Ma 左右,藏南地区(包括喜马拉雅带和冈底斯带)基本获得现代的高海拔。较可靠的证据来自 Spicer *et al.* (2003)对南木林盆地植物化石的研究,其根据藏南南木林盆地发现的植物化石组合,认为南木林盆地在 15 Ma 海拔达到 4 600 m 以上,和现在该地区的海拔几乎无区别;Currie *et al.* (2005)根据南木林盆地沉积物稳定同位素的分析也得到一致结论;笔者对吉隆盆地碎屑裂变迹年龄分析也揭示吉隆盆地蚀源区在 16.7~11.6 Ma 间随着藏南拆离系的发展存在明显的地表抬升,并至少在大约 12 Ma 藏南拆离系停止活动时获得现在的地表高度;Garzione *et al.* (2000a, 2000b, 2003)对尼泊尔 Thakkhola 地堑的中新世沉积物的氧同位素分析也得出结论,认为盆地基底在大约 11 Ma 已经达到约 4 km 的高海拔。进一步对盆地沉积、孢粉和古土壤分析发现,盆地底部年龄为 11.0~9.6 Ma 的 Tetang 组的古气候条件比上覆 7 Ma 以后沉积的 Thakkhola 组更潮湿,这一气候变化与在西瓦里克前陆盆地、阿拉伯海和孟加拉湾等地观察到的在大约 8~7 Ma 的气候变化一致。以前一般认为是响应青藏高原隆升的亚洲季风增强的产物(Burbank *et al.*, 1993; Derry and France-Lanord, 1996)。然而,系列新的古海拔高度证据显示,藏南和冈底斯地区高海拔一般出现在系列近南北向地堑的形成之前,也早于 8~7 Ma 亚洲季风的增强时期。因此,Garzione *et al.* (2005)认为亚洲季风的增强与高原隆升并不是简单的对应关系。

15~12 Ma 左右藏南地区达到现今高海拔与该时期构造背景相匹配。由于先期强烈逆冲推覆和地壳强烈加厚,在均衡回弹控制下,藏南地区于大约 16~17 Ma 开始形成藏南拆离系和北喜马拉雅构造带的系列穹隆构造,在这种背景下,深部物质折返必然引起大规模的地表抬升,地表抬升的结果是造成藏南地区的重力不稳定性,从而进一步诱发系列近南北向裂陷盆地的发育。

班公湖—怒江断裂以北的青藏高原腹地此时的古海拔高度仍不十分明朗。但是这一时期高原腹地出现的富钾埃达克质火山岩(18~13 Ma)表明中新世中晚期青藏高原腹地也已具有相当的地壳厚度(魏启荣等,2007),按照地壳均衡原理,其地表应该

出现相当的地表抬升,另外,以康托组(E_3N_1k)和五道梁组($N_1\omega$)为代表的沉积盆地抬升消亡也反映了区域性的地表抬升。

低温热年代学资料揭示高原东部藏东和川滇西部地区在13~9 Ma间表现出快速的河流下切(Clark *et al.*, 2005),反映存在快速的地表抬升。藏东和川滇西部诸多盆地均表现强的抬升消亡而缺失沉积,说明青藏高原东部在中新世中晚期也具备相当的地表海拔高度。

高原北缘地区在中新世中晚期强烈的构造抬升导致高原向北的扩展。西昆仑山系列向北逆冲断层强烈活动,蚀源区向北扩展,现代西昆仑山成形;阿尔金断裂强烈全面活动,阿尔金山现代构造地貌格局形成;祁连山系列逆冲断层再次强烈活动,祁连山继续向北扩展,党河南山逆冲带强烈活动,控制了党河南山的形成;东北缘地区在约8 Ma逆冲断层控制下强烈突起成山,现代盆—山地貌格局成型,如拉脊山作为单一山体加速抬升并明显分隔南部的贵德—循化盆地和北部的西宁—临夏盆地。由此可见,中新世中晚期是青藏高原北缘现代地貌格局的主要塑造时期。但从整体来说,青藏高原北缘此阶段尚未达到现今的平均海拔,古植物化石、古动物化石、古岩溶、古夷平面、沉积相(如标志山地上升的扇砾岩为主的内陆磨拉石沉积)、古土壤、古气候等方面的综合研究结果表明,高海拔的出现应该是在上新世晚期(约3.6 Ma)以来(崔之久等,1996, 1998;钟大赉和丁林,1996;李吉均和方小敏,1998;施雅风等,1999;李吉均等,2001)。

综上所述,笔者将中新世中晚期青藏高原的地表轮廓概括为以下台阶式结构(图1c):一级台阶包括甜水海—冈底斯—北喜马拉雅地区,其海拔和现在的平均海拔类似,但是喜马拉雅山主脊的异常高海拔当时可能还没有出现;二级台阶主要包括青藏高原腹地的羌塘—可可西里—松潘—甘孜广大地区,海拔高度不十分明朗,但应具有能够对大气环流起重要影响并且促使东亚季风形成的古高度;三级台阶主要指青藏高原北缘的西昆仑—阿尔金—祁连—东昆仑—拉脊山地区,现代盆—山地貌格局基本形成,但平均海拔高度并不高,应在2 000 m以下。

2.5 上新世以来

上新世以来是青藏高原强烈地表抬升及现代地貌格局的成型时期(图1d)。南部喜马拉雅地区主要由主边界断层控制,在逆冲和气候引起的降水加强的双重控制下,喜马拉雅南坡下蚀作用加强,地貌反

差加剧,系列大于7 000 m甚至8 000 m的异常高海拔山系形成;冈底斯地区基本维持上一阶段形成的高海拔状态;腹地的羌塘—可可西里—松潘—甘孜广大地区发生整体地表抬升,达到现今海拔高度;北部东昆仑地区在东昆仑断裂的控制下加剧抬升,形成高原北部的重要台阶边界;更北部的西昆仑、阿尔金、祁连山和拉脊山等山脉也加剧抬升,并向盆地方向扩展,在平均海拔增大的基础上,地貌反差也加剧,现今盆山相间的高原边部地貌格局最终形成。

3 结论

(1)本文对青藏高原不同部位已有的低温热年代学资料、沉积和构造演化的对比分析揭示了青藏高原新生代构造隆升剥露过程存在明显的阶段性,可以划分出65~35 Ma(古新世—始新世)、25~17 Ma(渐新世晚期—中新世早期)、13~7 Ma(藏南18~13)(中新世中晚期)和大约5 Ma以来4个主要强构造隆升剥露阶段。

(2)约65 Ma印度板块和欧亚板块的开始碰撞拉开了青藏高原新生代构造抬升的帷幕。古新世—始新世时期(65~35 Ma)碰撞及碰撞后的持续挤压引起青藏高原地域广泛的岩石抬升剥露。强构造抬升区主要分布于冈底斯、北喜马拉雅构造带、喜马拉雅东构造结雅鲁藏布江大拐弯地区、甜水海、阿尔金山北部的拉配泉—红柳沟、柴达木北缘的祁连山和高原东北缘的东昆仑东段及黄河源地区;主要表现为受逆冲推覆作用控制的不同层次岩石抬升剥露。隆起蚀源区主要位于松潘—甘孜—巴颜喀拉、阿尔金—祁连山、甜水海、冈底斯地区;羌塘—可可西里—柴达木以及西宁—兰州地区为低海拔冲泛平原区;西北部和南部地区尽管存在强烈的岩石抬升,但地表大面积仍保持为残留海沉积区。

(3)渐新世晚期—中新世早期(25~17 Ma)的强构造抬升期影响范围广,强度大,除了岩石抬升外,地表抬升也表现明显,致使蚀源区范围扩大,并在构造地貌上发生较大变革。控制构造抬升的表现除阿尔金和滇西地区主要为走滑控制外,主体仍以逆冲推覆为主。南部藏南地区在该阶段的强烈逆冲推覆作用引起藏南冈底斯—喜马拉雅地区地壳厚度强烈加厚,之后在约17~12 Ma间由于重力的不稳定而在原逆冲剪切带基础上发生构造反转,引发藏南拆离系的形成,并进一步导致高喜马拉雅结晶岩

系的剥露。而藏南的冈底斯和北喜马拉雅地区可能受均衡作用的控制,通过强的地表抬升而获得现在的地表高海拔;青藏高原腹地的羌塘—可可西里广大地区,主体为前陆盆地发育期,海拔高度不十分明朗;北缘的西昆仑—阿尔金—祁连—东昆仑—拉脊山地区,现代盆—山地貌格局雏形形成,但平均海拔高度低。

(4)中新世中晚期(13~7 Ma)是青藏高原边缘和内部系列断裂构造活动时期,形成系列由断裂控制的断陷盆地。这一阶段,青藏高原的构造分异渐趋明显,不同部位断裂构造活动特点的不同,形成了不同类型的断陷。青藏高原北缘地区强构造抬升,除阿尔金地区受左旋走滑断层控制外,在西昆仑、东昆仑、祁连和黄河源地区,主体仍受挤压逆冲推覆控制,在逆冲挤压和转换挤压构造背景下,系列山系崛起于盆地之上,现代盆—山地貌格局基本形成,但地表海拔高度可能并不高;藏南的冈底斯和北喜马拉雅地区主要表现为,在已经获得最大的高海拔的基础上,系列近南北向裂陷盆地和少量平行造山带方向的断陷盆地的发育和扩展。近南北向断陷盆地的出现标志着青藏高原进入新的构造阶段,即从近南北向的地壳收缩加厚转为近东西向的扩展或向东蠕散;青藏高原腹地羌塘—可可西里地区,盆地发生区域性的抬升,尽管古海拔高度仍不十分明朗,但应具有相当高度;青藏高原东部地区,除龙门山向东逆冲推覆外,藏东和川滇西部地区主要为受控于系列大型走滑断层控制的构造抬升和拉分盆地的发育。

(5)上新世以来(5.0 或 3.6 Ma 以来)是青藏高原加速岩石抬升剥露期,也是青藏高原强烈地表抬升和高原快速扩展期。南部喜马拉雅地区主要由主边界断层控制,在逆冲和气候引起的降水加强的双重控制下,喜马拉雅南坡下蚀作用加强,地貌反差加剧,系列大于 7 000 m 甚至 8 000 m 的异常高海拔山系形成;冈底斯地区基本维持上一阶段形成的高海拔状态;腹地的羌塘—可可西里—松潘—甘孜广大地区发生整体地表抬升达到现今海拔高度;北部东昆仑地区在东昆仑断裂的控制下加剧抬升,形成高原北部的重要的台阶边界;更北部的西昆仑、阿尔金、祁连山和拉脊山等山脉也加剧抬升,并向盆地方向扩展,在平均海拔增大的基础上,地貌反差也加剧,现今盆山相间的高原边部地貌格局最终形成。

References

Arnaud, N. O., Brunel, M., Cantagrel, J. M., et al., 1993.

High cooling and denudation rates at Kongur Shan, eastern Pamir (Xinjiang, China) revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ alkali feldspar thermochronology. *Tectonics*, 12 (6): 1335—1346. doi:10.1029/93TC00767

Beaumont, C., Jamieson, R. A., Nguyen, M. H., et al., 2001. Himalayan tectonics explained by extrusion of a low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414: 738—742. doi:10.1038/414738a

Blisniuk, P. M., Stern, L. A., 2005. Stable isotope paleoaltimetry: a critical review. *American Journal of Science*, 305:1033—1074. doi:10.2475/ajs.305.10.1033

Burbank, D. W., Blythe, A. E., Putkonen, J., et al., 2003. Decoupling of erosion and precipitation in the Himalayas. *Nature*, 426:652—655. doi:10.1038/nature02187

Burbank, D. W., Derry, L. A., France-Lanord, C., 1993. Reduced Himalayan sediment production 8 Myr ago despite an intensified monsoon. *Nature*, 364:48—50. doi:10.1038/364048a0

Burchfiel, B. C., Chen, Z., Hodges, K. V., et al., 1992. The South Tibetan detachment system, Himalayan orogen: extension contemporaneous with and parallel to shortening in a collisional mountain belt. *Special Paper—Geological Society of America*, 269:1—41.

Chen, J., Heermance, R. V., Burbank, D. W., et al., 2007. Magnetochronology and its implications of the Xiyu conglomerate in the southwestern Chinese Tianshan foreland. *Quaternary Sciences*, 27 (4): 576—587 (in Chinese with English abstract).

Chen, S. F., Wilson, C. J. L., 1996. Emplacement of the Longmen Shan thrust-nappe belt along the eastern margin of the Tibetan plateau. *Journal of Structural Geology*, 18(4): 413—430. doi:10.1016/0191—8141(95)00096—V

Chen, Z. L., Gong, H. L., Li, L., et al., 2006. Cenozoic uplifting and exhumation process of the Altyn Tagh Mountains. *Earth Science Frontiers*, 13(4):91—102 (in Chinese with English abstract).

Chung, S. L., Lo, C. H., Lee, T. Y., et al., 1998. Diachronous uplift of the Tibetan plateau starting 40 Myr ago. *Nature*, 394:769—773. doi:10.1038/29511

Clark, M. K., House, M. A., Royden, L. H., et al., 2005. Late Cenozoic uplift of southeastern Tibet. *Geology*, 33 (6):525—528. doi:10.1130/G21265.1

Coleman, M., Hodges, K., 1995. Evidence for Tibetan plateau uplift before 14 Myr ago from a new minimum age for east-west extension. *Nature*, 374: 49—52. doi:10.1038/374049a0

- Coleman, M. E. , 1998. U-Pb constraints on Oligocene-Miocene deformation and anatexis within the Central Himalaya, Marsyandi valley, Nepal. *American Journal of Science*, 298(7): 553—571.
- Cui, Z. J. , Gao, Q. Z. , Liu, G. N. , et al. , 1996. Planation surfaces, palaeokarst and uplift of Xizang (Tibet) plateau. *Science in China (Ser. D)*, 26(4): 378—386 (in Chinese).
- Cui, Z. J. , Wu, Y. Q. , Liu, G. N. , et al. 1998. On Kunlun-Yellow River tectonic movement. *Science in China (Ser. D)*, 28(1): 53—59 (in Chinese).
- Currie, B. S. , Rowley, D. B. , Tabor, N. J. , 2005. Middle Miocene paleoaltimetry of southern Tibet: implications for the role of mantle thickening and delamination in the Himalayan orogen. *Geology*, 33: 181—184.
- Dai, S. , Fang, X. M. , Song, C. H. , et al. , 2005. Early tectonic uplift of the northern Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 50(7): 673—683 (in Chinese).
- DeCelles, P. G. , Quade, J. , Kapp, P. , et al. , 2007. High and dry in central Tibet during the Late Oligocene. *Earth and Planetary Science Letters*, 253(3—4): 389—401. doi:10. 1016/j. epsl. 2006. 11. 001
- Derry, L. A. , France-Lanord, C. , 1996. Neogene Himalayan weathering history and river $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$: impact on the marine Sr record. *Earth and Planetary Science Letters*, 142(1—2): 59—74. doi: 10. 1016/0012—821X(96)00091—X
- Ding, L. , 2003. Paleocene deep-water sediments and radiolarian faunas: implications for evolution of Yarlung-Zangbo foreland basin, southern Tibet. *Science in China (Ser. D)*, 33(1): 47—58 (in Chinese).
- Ding, L. , Zhong, D. L. , Pan, Y. S. , et al. , 1995. Fission track dating evidence on fast uplifting since Pliocene of the eastern Himalayan syntaxis. *China Science Bulletin*, 40(16): 1497—1500 (in Chinese).
- Fang, X. M. , Song, C. H. , Dai, S. , et al. , 2007. Cenozoic deformation and uplift of the NE Qinghai-Tibet plateau: evidence from high-resolution magnetostratigraphy and basin evolution. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 230—242 (in Chinese with English abstract).
- Garzzone, C. N. , DeCelles, P. G. , Hodkinson, D. G. , et al. , 2003. East-west extension and Miocene environmental change in the southern Tibetan plateau: Thakkhola graben, Central Nepal. *GSA Bulletin*, 115(1): 3—20. doi: 10. 1130/0016—7606(2003)115<0003: EWEAME>2. 0. CO;2
- Garzzone, C. N. , Dettman, D. L. , Quade, J. , et al. , 2000a. High times on the Tibetan plateau: paleoelevation of the Thakkhola graben, Nepal. *Geology*, 28(4): 339—342. doi:10. 1130/0091—7613(2000)28<339: HTOTTP>2. 0. CO
- Garzzone, C. N. , Quade, J. , DeCelles, P. G. , et al. , 2000b. Predicting paleoelevation of Tibet and the Himalaya from $\delta^{18}\text{O}$ vs. altitude gradients in meteoric water across the Nepal Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 183(1—2): 215—229. doi:10. 1016/S0012—821X(00)00252—1
- Godard, V. , Lave, J. , Cattin, R. , 2006. Numerical modelling of erosion processes in the Himalayas of Nepal: effects of spatial variations of rock strength and precipitation. *Geological Society, London, Special Publications*, 253: 341—358. doi:10. 1144/GSL. SP. 2006. 253. 01. 18
- Grujic, D. , Coutand, I. , Bookhagen, B. , et al. , 2006. Climate forcing of erosion, landscape, and tectonics in the Bhutan Himalayas. *Geology*, 34(10): 801—804. doi: 10. 1130/G22648. 1
- Harris, N. , 1995. Significance of weathering Himalayan metasedimentary rocks and leucogranites for the Sr isotope evolution of sea water during Early Miocene. *Geology*, 23(9): 759—798. doi:10. 1130/0091—7613(1995)023<0795: SOWHMR>2. 3. CO;2
- Harrison, T. M. , Copeland, P. , Kidd, W. , et al. , 1995. Activation of the Nyainqentanghla shear zone: implications for uplift of the southern Tibetan plateau. *Tectonics*, 14(3): 658—676.
- Huntington, K. W. , Blythe, A. E. , Hodges, K. V. , 2006. Climate change and Late Pliocene acceleration of erosion in the Himalaya. *Earth and Planetary Science Letters*, 252(1—2): 107—118. doi:10. 1016/j. epsl. 2006. 09. 031
- Kohn, M. J. , Dettman, D. L. , 2007. Paleoelevation from stable isotope compositions of fossils. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 66(1): 119—154. doi: 10. 2138/rmg. 2007. 66. 5
- Lai, Q. Z. , Ding, L. , Wang, H. W. , et al. , 2006. Constraining the stepwise migration of the eastern Tibetan plateau margin by apatite fission track thermochronology. *Science in China (Ser. D)*, 36(9): 785—796 (in Chinese).
- Li, G. B. , Wan, X. Q. , Qi, H. R. G. , et al. , 2002. Eocene fossil carbonate microfacies and sedimentary environment in Gangba-Tingri, southern Tibet. *Chinese Geology*, 29(4): 401—406 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B. , Yang, J. S. , 2004. Evidence for Cretaceous uplift of the northern Qinghai-Tibetan plateau. *Earth Science Frontiers*, 11(4): 345—359 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. B. , Yang, J. S. , Xu, Z. Q. , et al. , 2001. Age of the Altyn Tagh fault: evidence from U-Pb SHRIMP dating of

- the syn-tectonic zircon. *Geological Review*, (3): 315—316 (in Chinese).
- Li, J. J., Fang, X. M., 1998. Uplift of the Tibetan plateau and environmental changes. *Chinese Science Bulletin*, 43 (15): 1569—1574 (in Chinese).
- Li, J. J., Fang, X. M., Pan, B. T., et al., 2001. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang plateau and its impacts on environments in surrounding area. *Quaternary Sciences*, 21 (5): 381—391 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J. L., Pan, H. X., Ren, S. M., et al., 2003. Flower-structures formed in two levels along the Altun fault. *Chinese Journal of Geology*, 38 (1): 52—59 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. J., Genser, J., Neubauer, F., et al., 2005. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ mineral ages from basement rocks in the eastern Kunlun Mountains, NW China, and their tectonic implications. *Tectonophysics*, 398 (3—4): 199—224. doi: 10. 1016/j. tecto. 2005. 02. 007
- Molnar, P., 2004. Late Cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment; how might climate change have affected erosion rates? *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32: 67—89. doi: 10. 1146/annurev. earth. 32. 091003. 143456
- Molnar, P., England, P., 1990. Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change; chicken or egg? *Nature*, 346: 29—34. doi: 10. 1038/346029a0
- Molnar, P., England, P., Martinod, J., 1993. Mantle dynamics, uplift of the Tibetan plateau, and the Indian monsoon. *Reviews of Geophysics*, 31: 357—396. doi: 10. 1029/93RG02030
- Molnar, P., Houseman, G. A., England, P. C., 2006. Earth science: palaeo-altimetry of Tibet. *Nature*, 444, E4. doi: 10. 1038/nature05368
- Pan, G. T., Wang, P. S., Xu, Y. R., et al., 1990. Cenozoic tectonic evolution of Qinghai-Xizang plateau. Geological Publishing House, Beijing, 1—165 (in Chinese).
- Parrish, R. R., Hodges, K. V., 1993. Miocene (22 ± 1 Ma) metamorphism and two stage thrusting in the Greater Himalayan sequence, Annapurna Sanctuary, Nepal. *Geological Society of America Abstract with Program*, 25A: 174.
- Qian, D. Y., 1985. A discussion on the age of Qiuwu coal measures and the preliminary correlation of the molasse formation at the Ladakh-Gandise marginal mountain Chain. *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang plateau*, 16: 229—241 (in Chinese).
- Rowley, D. B., Currie, B. S., 2006. Palaeo-altimetry of the Late Eocene to Miocene Lunpola basin, Central Tibet, *Nature*, 439: 677—681. doi: 10. 1038/nature04506
- Rowley, D. B., 2007. Stable isotope-based paleoaltimetry: theory and validation. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 66 (2): 23—52.
- Schlup, M., Carter, A., Cosca, M., et al., 2003. Exhumation history of eastern Ladakh revealed by $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and fission-track ages; the Indus River-Tso Moriri transect, NW Himalaya. *Journal of the Geological Society*, 160 (3): 385—399. doi: 10. 1144/0016-764902-084
- Shao, L. Y., He, Z. P., Gu, J. Y., et al., 2006. Lithofacies palaeogeography of the Paleogene in Tarim basin. *Journal of Palaeogeography*, 8 (3): 353—364 (in Chinese with English abstract).
- Shi, Y. F., Li, J. J., Li, B. Y., et al., 1999. Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic. *Acta Geographica Sinica*, 54 (1): 10—21 (in Chinese with English abstract).
- Song, C. H., Fang, X. M., Li, J. J., et al., 2001. Tectonic uplift and sedimentary evolution of the Jiuxi basin in the northern margin of the Tibetan plateau since 13 MaBP. *Science in China (Ser. D)*, 31 (Suppl.): 155—162 (in Chinese).
- Sorkhabi, R. B., Stump, E., Foland, K. A., et al., 1996. Fission-track and $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ evidence for episodic denudation of the Gangotri granites in the Garhwal Higher Himalaya, India. *Tectonophysics*, 260 (1—3): 187—199. doi: 10. 1016/0040-195(96)00083-2
- Spicer, R. A., Harris, N. B. W., Widdowson, M., et al., 2003. Constant elevation of southern Tibet over the past 15 million years. *Nature*, 421: 622—624. doi: 10. 1038/nature01356
- Tapponnier, P., Xu, Z. Q., Roger, F., et al., 2001. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet plateau. *Science*, 294 (5547): 1671—1677. doi: 10. 1126/science. 105978
- Thiede, R. C., Bookhagen, B., Arrowsmith, J. R., et al., 2004. Climatic control on rapid exhumation along the southern Himalayan Front. *Earth and Planetary Science Letters*, 222 (3—4): 791—806. doi: 10. 1016/j. epsl. 2004. 03. 015
- Thiede, R. C., Ehlers, T. A., Bookhagen, B., et al., 2009. Erosional variability along the Northwest Himalaya. *Journal of Geophysical Research*, 114, F01015. doi: 10. 1029/2008JF001010
- Vannay, J. C., Grasemann, B., Rahn, M., et al., 2004. Miocene to Holocene exhumation of metamorphic crustal wedges in the Himalayan orogen; evidence for tectonic extrusion coupled to fluvial erosion. *Tectonics*, 23 (TC1014): 1—24. doi: 10. 1029/2002TC001429

- Wan, X. Q., 1990. Cretaceous-early tertiary foraminifera of Xizang (Tibet) and evolution of the Tethys-Himalayan sea. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 7(2): 169—186 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Zhao, X. X., Liu, Z. F., et al., 2008a. Constraints on the early uplift history of the Tibetan plateau. *PNAS*, 105(13): 4987—4992. doi: 10.1073/pnas.0703595105
- Wang, E. Q., Chen, L. Z., Chen, Z. L., 2002. Tectonic and climatic element-controlled evolution of the Yalungzangbu River in southern Tibet. *Quaternary Sciences*, 22(4): 365—373 (in Chinese with English abstract).
- Wang, E. Q., Wan, J. L., Liu, J., 2003. Late Cenozoic geological evolution of the foreland basin bordering the West Kunlun range in Pulu area: constrain on timing of uplift of northern margin of the Tibet plateau. *Journal of Geophysical Research*, 108(B8): 2401. doi: 10.1029/2002JB001877
- Wang, G., Wan, J. L., Wang, E. Q., et al., 2006. Extensional collapse of the southern part of the Gaoligong range in the western Yunnan, China and its tectonic origin. *Acta Geologica Sinica*, 80(9): 1262—1273 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. C., Garver, J. I., Liu, C., 2008b. Cenozoic tectonic history in the Gyirong-Nyalam area, South Tibet: evidence from fission-track thermochronology. In: Garver, J. I., Montorio, M., eds., *Proceedings from the 11th International Conference on thermochronometry*, Anchorage Alaska, Sept. 2008.
- Wang, G. C., Xiang, S. Y., Wang, A., et al., 2007. Thermochronological constraint to the processes of the East Kunlun and adjacent areas in Mesozoic-Early Cenozoic. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 605—614, 680 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., 1998. Uplift of the Karibasheng and Kuzigan granite in the West Kunlun Mountains—evidence from apatite fission track analysis. *Geological Review*, 44(4): 435—442 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. B., Wang, Y., Liu, X., et al., 2001. Apatite fission-track records of Mesozoic and Cenozoic episodic reactivation of the Tianshan and West Kunlun Mountains. *Regional Geology of China*, 20(1): 94—99 (in Chinese with English abstract).
- Wei, Q. R., Li, D. W., Wang, G. C., et al., 2007. Zircon SHRIMP U-Pb dating and geochemical characteristics of Chabaoma Formation volcanic rocks in northern Tibetan plateau and its petrogenesis. *Acta Petrologica Sinica*, 23(11): 2727—2736 (in Chinese with English abstract).
- Whipple, K. X., Tucker, G. E., 1999. Dynamics of the stream-power river incision model: implications for height limits of mountain ranges, landscape response timescales, and research needs. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 104(B8): 17661—17674. doi: 10.1029/1999JB900120
- Willett, S. D., 1999. Orogeny and orography: the effects of erosion on the structure of mountain belts. *Journal of Geophysical Research—Solid Earth*, 104(B12): 28957—28981. doi: 10.1029/1999JB900248
- Williams, H., Turner, S., Kelley, S., Harris, N., 2001. Age and composition of dikes in southern Tibet: new constraints on the timing of east-west extension and its relationship to postcollisional volcanism. *Geology*, 29(4): 339—342. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0339: AACODI>2.0.CO;2
- Wu, Z. H., Hu, D. G., Liu, Q. S., et al., 2005. Chronological analyses of the thermal evolution of granite and the uplift process of the Nyainqentanglha range in Central Tibet. *Acta Geoscientica Sinica*, 26(6): 505—512 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Z. H., Meng, X. G., Hu, D. G., et al., 2004. New results and major progress in regional geological survey of the Damxung County sheet. *Geological Bulletin of China*, 23(5—6): 484—491 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, J. D., 1988. The Early Tertiary Ouli Formation and its scleractinia in Ngari region, Xizang (Tibet). *Contribution to the Geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau*, 19: 120—131 (in Chinese).
- Xiang, H. F., Wan, J. L., Han, Z. J., et al., 2006. Geological analysis and FT dating of the large-scale right-lateral strike-slip movement of the Red River fault zone. *Science in China (Ser. D)*, 36(11): 977—987 (in Chinese).
- Xu, Z. Q., Cai, Z. H., Zhang, Z. M., et al., 2008. Tectonic and fabric kinematics of the Namche Barwa terrane, eastern Himalayan syntaxis. *Acta Petrologica Sinica*, 24(7): 1463—1476 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Dang, Y. Q., Chen, X. H., et al., 2007. Cenozoic evolution and tectonic reconstruction of the Qaidam basin: evidence from seismic profiles. *Journal of Geomechanics*, 13(3): 193—211 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, D. Y., Zhang, P. Z., Fang, X. M., et al., 2007. Late Cenozoic tectonic deformation of the Linxia basin, northeastern margin of the Qinghai-Tibet plateau. *Earth Science Frontiers*, 14(1): 243—250 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W. M., Wang, S. C., Li, S. R., et al., 2001. Apatite fission track dating evidence on the tectonization of

- Gangdese block, South Qinghai-Tibetan plateau. *Chinese Science Bulletin*, 46(20): 1739—1742 (in Chinese).
- Zeitler, P. K., 1985. Cooling history of the NW Himalaya, Pakistan. *Tectonics*, 4(1): 127—151.
- Zhang, B. G., Mu, X. N., 1979. The discovery of the Tertiary marine deposits to the north of the Yarlung Tsangpo River, Xizang. *Acta Stratigraphica Sinica*, 3(1): 65—66 (in Chinese).
- Zhang, J. J., Ji, J. Q., Zhong, D. L., et al., 2003. Structural pattern of eastern Himalayan syntaxis in Namjagbarwa and its formation process. *Science in China (Ser. D)*, 33(4): 373—383 (in Chinese).
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Cao, K., et al., 2008. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet plateau. *Science in China (Ser. D)*, 38(12): 1575—1588.
- Zhang, K. X., Wang, G. C., Chen, F. N., et al., 2007. Coupling between the uplift of Qinghai-Tibet plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 583—597 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, P. Z., Molnar, P., Downs, W. R., 2001. Increased sedimentation rates and grain sizes 2-4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature*, 410: 891—897. doi: 10. 1038/35073504
- Zhang, P. Z., Zheng, D. W., Yin, G. M., et al., 2006. Discussion on Late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan plateau. *Quaternary Sciences*, 26(1): 5—13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Li, Y., Zhou, R. J., et al., 2006. The denudation of the eastern margin of the Qinghai-Xizang plateau since the Late Cenozoic: evidence from the fission-track ages. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 26(1): 97—102 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Z. Z., Li, Y. T., Ye, H. F., et al., 2001. Stratigraphy of the Qinghai-Tibet plateau. Science Press, Beijing, 1—542 (in Chinese).
- Zhong, D. L., Ding, L., 1996. Rising process of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau and its mechanism. *Science in China (Ser. D)*, 26(4): 289—295 (in Chinese).
- 原隆升. 中国科学(D 辑), 26(4): 378—386.
- 崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等, 1998. 关于“昆仑—黄河运动”. 中国科学(D 辑), 28(1): 53—59.
- 戴霜, 方小敏, 宋春晖, 等, 2005. 青藏高原北部的早期隆升. 科学通报, 50(7): 673—683.
- 丁林, 2003. 西藏雅鲁藏布江缝合带古新世深水沉积和放射虫动物群的发现及对前陆盆地演化的制约. 中国科学(D 辑), 33(1): 47—58.
- 丁林, 钟大赉, 潘裕生, 等, 1995. 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, 40(16): 1497—1500.
- 方小敏, 宋春晖, 戴霜, 等, 2007. 青藏高原东北部阶段性变形隆升: 西宁、贵德盆地高精度磁性地层和盆地演化记录. 地学前缘, 14(1): 230—242.
- 来庆洲, 丁林, 王宏伟, 等, 2006. 青藏高原东部边界扩展过程的磷灰石裂变径迹热历史制约. 中国科学(D 辑), 36(9): 785—796.
- 李国彪, 万晓樵, 其和日格, 等, 2002. 藏南岗巴—定日地区始新世化石碳酸盐岩微相与沉积环境. 中国地质, 29(4): 401—406.
- 李海兵, 杨经绥, 2004. 青藏高原北部白垩纪隆升的证据. 地学前缘, 11(4): 345—359.
- 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 等, 2001. 阿尔金断裂带的形成时代——来自于同构造生长锆石 U-Pb SHRIMP 定年证据. 地质论评, (3): 315—316.
- 李吉均, 方小敏, 1998. 青藏高原隆起与环境变化研究. 科学通报, 43(15): 1569—1574.
- 李吉均, 方小敏, 潘宝田, 等, 2001. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响. 第四纪研究, 21(5): 381—391.
- 刘俊来, 潘宏勋, 任收麦, 等, 2003. 阿尔金断裂双层花状构造的厘定. 地质科学, 38(1): 52—59.
- 潘桂棠, 王培生, 徐耀荣, 等, 1990. 青藏高原新生代构造演化. 北京: 地质出版社, 1—165.
- 钱定宇, 1985. 论秋乌煤系及拉达克至冈底斯陆缘山链磨拉石的时代. 青藏高原地质文集, 16: 229—241.
- 邵龙义, 何志平, 顾家裕, 等, 2006. 塔里木盆地古近纪岩相古地理. 古地理学报, 8(3): 353—364.
- 施雅风, 李吉均, 李炳元, 等, 1999. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化. 地理学报, 54(1): 10—21.
- 宋春晖, 方小敏, 李吉均, 等, 2001. 青藏高原北缘酒西盆地 13 Ma 以来沉积演化与构造隆升. 中国科学(D 辑), 31(增刊): 155—162.
- 万晓樵, 1990. 西藏白垩纪一早第三纪有孔虫与特提斯—喜马拉雅海的演化. 微体古生物学报, 7(2): 169—186.
- 王二七, 陈良忠, 陈智樑, 2002. 在构造和气候因素制约下的雅鲁藏布江的演化. 第四纪研究, 22(4): 365—373.
- 王刚, 万景林, 王二七, 等, 2006. 高黎贡山脉南部的晚新生代

附中文参考文献

- 陈杰, Heermance, R. V., Burbank, D. W., 等, 2007. 中国西南天山西域砾岩的磁性地层年代与地质意义. 第四纪研究, 27(4): 576—587.
- 陈正乐, 宫红良, 李丽, 等, 2006. 阿尔金山脉新生代隆升—剥露过程. 地学前缘, 13(4): 91—102.
- 崔之久, 高全洲, 刘耕年, 等, 1996. 夷平面、古岩溶与青藏高

- 构造—重力垮塌及其成因. 地质学报, 80(9): 1262—1273.
- 王国灿, 向树元, 王岸, 等, 2007. 东昆仑及相邻地区中生代—新生代早期构造过程的热年代学记录. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5): 605—614, 680.
- 王军, 1998. 西昆仑卡日巴生岩体和苦子干岩体的隆升—来自磷灰石裂变径迹分析的证据. 地质论评, 44(4): 435—442.
- 王彦斌, 王永, 刘训, 等, 2001. 天山、西昆仑山中、新生代幕式活动的磷灰石裂变径迹纪录. 中国区域地质, 20(1): 94—99.
- 魏启荣, 李德威, 王国灿, 等, 2007. 青藏高原北部查保马组火山岩的锆石 SHRIMP U-Pb 定年和地球化学特点及其成因意义. 岩石学报, 23(11): 2727—2736.
- 吴珍汉, 胡道功, 刘琦胜, 等, 2005. 念青唐古拉花岗岩热演化历史和山脉隆升过程的热年代学分析. 地球学报, 26(6): 505—512.
- 吴珍汉, 孟宪刚, 胡道功, 等, 2004. 当雄县幅地质调查新成果及主要进展. 地质通报, 23(5—6): 484—491.
- 向宏发, 万景林, 韩竹军, 等, 2006. 红河断裂带大型右旋走滑运动发生时代的地质分析与 FT 测年. 中国科学(D 辑), 36(11): 977—987.
- 肖劲东, 1988. 西藏阿里地区早第三纪欧利组及六射珊瑚. 青藏高原地质文集, 19: 120—131.
- 许志琴, 蔡志慧, 张泽明, 等, 2008. 喜马拉雅东构造结—南迦巴瓦构造及组构运动学. 岩石学报, 24(7): 1463—1476.
- 尹安, 党玉琪, 陈宣华, 等, 2007. 柴达木盆地新生代演化及其构造重建——基于地震剖面的解释. 地质力学学报, 13(3): 193—211.
- 袁道阳, 张培震, 方小敏, 等, 2007. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程. 地学前缘, 14(1): 243—250.
- 袁万明, 王世成, 李胜荣, 等, 2001. 西藏冈底斯带构造活动的裂变径迹证据. 科学通报, 46(20): 1739—1742.
- 章炳高, 穆西南, 1979. 西藏雅鲁藏布江以北海相第三系的发现. 地层学杂志, 3(1): 65—66.
- 张进江, 季建清, 钟大赉, 等, 2003. 东喜马拉雅南迦巴瓦构造结的构造格局及形成过程探讨. 中国科学(D 辑), 33(4): 373—383.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等, 2007. 青藏高原古近纪—新近纪隆升与沉积盆地分布耦合. 地球科学——中国地质大学学报, 32(5): 583—597.
- 张培震, 郑德文, 尹功明, 等, 2006. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论. 第四纪研究, 26(1): 5—13.
- 张毅, 李勇, 周荣军, 等, 2006. 晚新生代以来青藏高原东缘的剥蚀过程: 来自裂变径迹的证据. 沉积与特提斯地质, 26(1): 97—102.
- 赵政璋, 李永铁, 叶和飞, 等, 2001. 青藏高原地层. 北京: 科学出版社, 1—542.
- 钟大赉, 丁林, 1996. 青藏高原的隆起过程及其机制探讨. 中国科学(D 辑), 26(4): 289—295.