

doi: 10.12029/gc20160601

张岳桥, 李海龙. 青藏高原东部晚新生代重大构造事件与挤出造山构造体系[J]. 中国地质, 2016, 43(6): 1829–1852.

Zhang Yueqiao, Li Hailong. Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion-related orogenic system[J]. Geology in China, 2016, 43(6): 1829–1852(in Chinese with English abstract).

# 青藏高原东部晚新生代重大构造事件 与挤出造山构造体系

张岳桥<sup>1</sup> 李海龙<sup>2</sup>

(1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏 南京 210023; 2. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081)

**摘要:**文章系统梳理了青藏高原东部地区晚新生代重大构造事件的沉积记录、岩浆记录和构造变形响应,重新厘定了青藏运动或横断事件的起始时限,建立了青藏高原东部晚新生代构造演化序列与挤出造山构造体系。研究认为,发生在上新世之前的青藏运动是青藏高原东部最重要的构造作用阶段,起始于距今 12~8 Ma,并持续到上新世早期,持续时间达 6~8 Ma。在这个构造运动阶段,青藏高原东部地块(川滇地块、川青地块、西秦岭构造带和陇中地块等)有序地向东挤出,受到鲜水河、东昆仑、海原等 WNW-ESE 向大型断裂左旋走滑运动调节,构造挤出同时伴随地块内部逆冲褶皱变形,导致地壳增厚和高原东缘山脉快速崛起;构造挤出也超越了现今东缘地貌边界,向东扩展导致扬子地块盖层滑脱褶皱,形成龙泉山、大凉山等褶皱构造带。上新世出现的砾石层(东缘前陆地带的大邑砾石层、临夏盆地的积石砾石层、兰州盆地的五泉砾石层等)标志了青藏高原东部差异性构造地貌的形成。上新世晚期至早更新世时期(3.6~1.0 Ma)对应一个构造松弛阶段,青藏高原东部整体进入冰冻时期,沿其东缘发育一系列受正断层控制的南北向伸展断陷盆地,如安宁河谷地、元谋盆地、盐源盆地、滇西北盆地群等,其中加积了以昔格达组为代表的稳定河湖相沉积。发生在早、中更新世之交(距今 1.0~0.6 Ma)的昆—黄运动或元谋事件使青藏高原东部地块进一步向东挤出、东缘地壳逆冲增厚和年轻山系加速隆升。晚更新世以来的构造运动称为共和运动或最新构造变动阶段,起始于距今约 120 ka,青藏高原东缘构造变形系统出现重大分化,南段川滇菱形地块发生绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动,形成川滇双弧形旋扭构造体系;而中段川青地块的挤出伴随东缘龙门山断裂带的右旋走滑运动和秦岭山系的向东挤出。在这个最新构造变动阶段,青藏高原东部下地壳通道流可能是重要的深部构造驱动因素。

**关键词:**青藏高原东部;晚新生代;青藏运动;横断事件;昆黄或元谋事件;共和运动;构造挤出造山作用;下地壳通道流。

中图分类号:P542;P552 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2016)06-1829-24

## Late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau and extrusion-related orogenic system

ZHANG Yue-qiao<sup>1</sup>, LI Hai-long<sup>2</sup>

收稿日期:2016-07-08;改回日期:2016-09-30

基金项目:国家自然科学基金(41472178)和中国地质调查局地质调查项目(1212011120167,12120114002211)联合资助。

作者简介:张岳桥,男,1963年生,教授,博士生导师,构造地质学专业,主要从事区域大地构造、新构造与活动构造、盆地构造分析等;

E-mail: 1203172528@qq.com。

(1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, Jiangsu, China; 2. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100081, China)

**Abstract:** This paper revised the chronology of major late Cenozoic tectonic events in east Tibetan Plateau, mostly based on records of stratigraphy in the basins and magmatism and deformation along active fault zones, with the purpose of establishing an evolution history of extrusion-related orogenic system. It is shown that the most important event, as previously named the Qingzang movement, was initiated at 12–8 Ma and lasted to early Pliocene, with a duration of 6–8 Ma. The crustal fragments in east Tibet, such as the Chuan–Dian, Chuan–Qing, Longzhong blocks, were orderly extruded eastward accommodated by large-scale sinistral strike-slip faults like the Xianshuihe, East Kunlun and Haiyuan faults. This eastward extrusion was concomitant with thrusting, which resulted in fast uplift of the ranges along its eastern edges, and went beyond this margin through decollement, generating folds of the cover rocks like the Longquanshan, Daliangshan in the Yangze craton. The deposition of late Pliocene conglomeratic layer, namely the Dayi conglomerates along the eastern foreland zone, the Jishi conglomerates and the Wuquan conglomerates at the northeast corner of Tibet, marked the emergence of contrast geomorphology in this region. Late Pliocene to early Pleistocene (3.6–1Ma) corresponds to a period of tectonically quiescence or relaxation, during which a set of N–S trending rift basins, such as Yuanmu, Yanyuan, and Anninghe, were developed along the eastern margin, and accumulated a series of fluvial-lacustrine facies deposits in these basins. This relaxation stage was followed in Early–Middle Pleistocene (1.0–0.6 Ma) by an important compressional event named the Kun–Huang or Yuanmu event, which caused further uplift of east Tibet. Active faulting pattern in east Tibet has been changed greatly since the late Pleistocene (about 120 Ka), featured along its southwest part by clockwise rotation around the east Himalaya syntax of two sinistral strike-slip fault zones, and along its central north part by a counter clockwise rotation accommodated by dextral strike-slip motion in the Longmenshan fault zone and eastward push of the Qinling range. The lower crustal flow could be a major driven mechanism for the deformation of this most recent stage.

**Key words:** eastern margin of Tibet; late Cenozoic; Qingzang movement; Hengduan event; Kun–Huang or Yuanmu event; Gonghe event; extrusion-related orogeny; lower crustal flow

**About the first author:** ZHANG Yue-qiao, male, born in 1963, professor and supervisor of doctor candidates, engages in neotectonics and active tectonics and basin structure analysis; E-mail: 1203172528@qq.com.

**Fund support:** Supported by China National Natural Science Foundation (No. 41472178), China Geological Survey Project (No. 1212011120167, 12120114002211).

## 1 引 言

青藏高原形成与隆升过程、由大陆碰撞产生的复杂的大陆内部造山及其深部机理一直是当今世界固体地球科学重要问题之一,吸引着世界地质科学家。重要的大地构造理论,如高原隆升过程<sup>[1]</sup>、高原地壳连续变形模式<sup>[2–5]</sup>、大陆地块侧向挤出逃逸模式<sup>[6–10]</sup>、下地壳流动模式<sup>[11–12]</sup>、地幔流动模式<sup>[13]</sup>等,均诞生于对青藏高原新生代构造和活动构造的研究,许多关键大陆动力学问题可以在此破解,因而一直吸引全球地质学家和地貌学家的关注,其理论意义不言而喻(图1)。

前人对喜马拉雅—青藏高原地区新生代构造运动发生的期次、幕次等给出了高度概括和总结。我国著名大地构造学家黄汲清先生<sup>[15]</sup>将新生代发生

的构造事件统称为喜马拉雅运动,而现今学者,如 Yin and Harrison<sup>[16]</sup>将新生代造山作用称为喜马拉雅—青藏造山作用。不同学者对喜马拉雅运动时期和构造幕进行了不同的划分。许多学者如任纪舜等<sup>[17]</sup>、马丽芳等<sup>[18]</sup>将喜马拉雅运动分为早期(50–40 Ma)、中期(约 15 Ma)、晚期(2.4 Ma)3期;贾承造<sup>[19]</sup>、贾承造等<sup>[20]</sup>基于塔里木盆地北缘库车凹陷中新世代地层不整合面,提出了喜马拉雅运动早、晚2期(即古近纪早喜马拉雅期、新近纪—第四纪晚喜马拉雅期)和3幕(始新世末、古近纪/新近纪之交和新近纪/第四纪之交发生的构造幕)的划分方案。马宗晋等<sup>[21]</sup>将青藏高原构造地貌演化划分为4个有叠合的构造期:45~35 Ma以南北缩短和向北推移为主的 $\alpha$ 期、35~5.3 Ma以长周期缓慢隆升的 $\beta$ 期、自5.3 Ma始至3.0 Ma以后逐渐达到高峰并以短周期快速

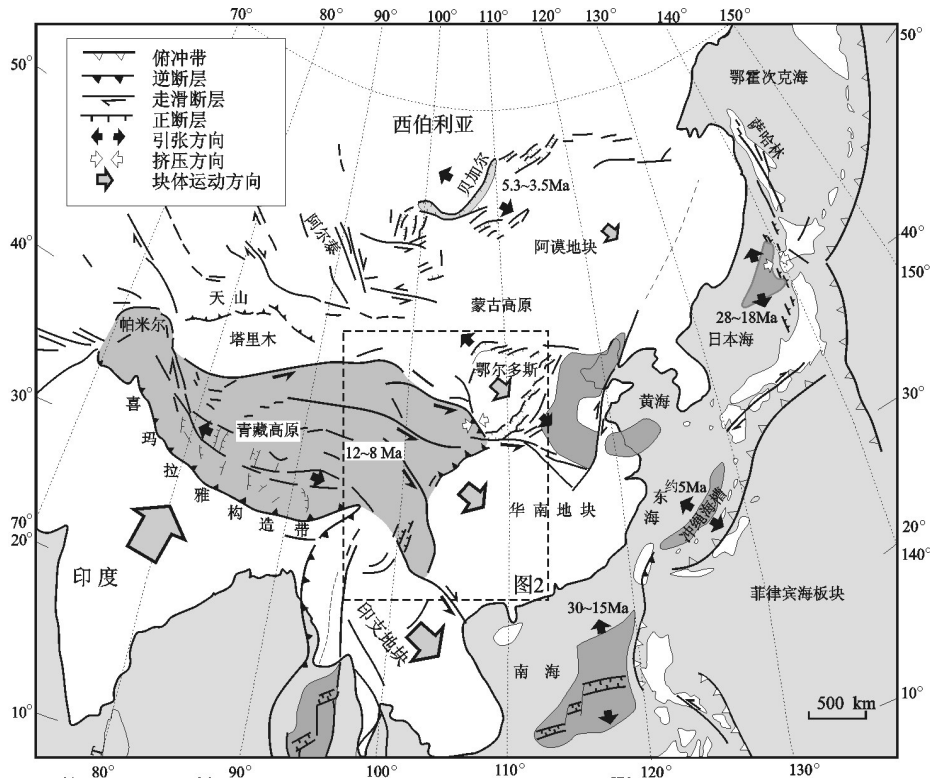


图1 东亚大陆新生代构造与青藏高原东部新构造位置图(据文献[14]修改)

Fig.1 Cenozoic tectonic map of East Asia and location of east Tibet (modified after reference [14])

隆升为特征的 $\gamma$ 期、3.0 Ma以来以东西向伸展变形为特征的 $\delta$ 期等。万天丰<sup>[22]</sup>则给出了完全不同的构造运动分期划分方案,命名为四川期(前52 Ma)、华北期(52~23 Ma)、喜马拉雅期(23~0.73 Ma)、新构造期(0.73 Ma以来)。葛肖虹等<sup>[23]</sup>基于对柴达木、吐鲁番—哈密、塔里木盆地的演化及其与青藏高原隆升耦合的研究,提出了高原隆升三阶段历史:古近纪伸展—拉张、中新世早—中期(23~11.7 Ma)初次隆升、0.9~0.8 Ma快速隆升,将青藏高原初始隆升与东部四川运动联系在一起<sup>[24]</sup>,并认为1~0.8 Ma的强烈隆升事件与印度洋中脊三联点附近的“亚澳”陨击事件有关<sup>[25]</sup>。而西方学者,如Tapponnier et al.<sup>[9]</sup>更注重青藏高原隆升迁移历史,识别出始新世南部青藏高原、渐新世—中新世中部青藏高原和上新世—第四纪北部青藏高原等三个演化阶段。

对青藏高原东部地区来说,晚新生代以来的构造事件存在不同的命名。李吉均等<sup>[26-29]</sup>、崔之久等<sup>[30]</sup>、Cui et al.<sup>[31]</sup>基于青藏高原东北隅和昆仑山口地区新生代盆地地层序列、地层接触关系、磁性地层学、黄河河谷侵蚀地貌和构造地貌研究,进一步细

化了晚新生代喜马拉雅运动分期划分,提出了青藏运动理论,识别了上新世以来的主要构造事件,分别命名为青藏运动A幕(3.5 Ma)、B幕(2.6 Ma)、C幕(1.7 Ma)、昆—黄运动(1~0.7 Ma)、共和运动(0.12 Ma以来)等,这些作者将晚新生代构造事件与高原快速隆升、构造地貌形成和气候变化直接联系在一起,认为青藏运动和昆—黄运动导致了青藏高原快速隆升,并由此塑造了现今的构造地貌格局。青藏运动理论影响较大,已被广大新构造和地理工作者所接纳并得到广泛应用。在川滇地区,晚新生代构造事件被命名为横断事件<sup>[32-33]</sup>、元谋运动<sup>[34]</sup>、最新构造变动<sup>[35-36]</sup>等。

从上述关于喜马拉雅运动的期次、幕次和新构造运动的划分等可以看出,新生代喜马拉雅—青藏造山作用具有阶段性或幕式发展特点,但这些观点均受到传统的Still造山旋回和褶皱幕思想的影响,缺乏对构造幕或构造事件发生的起始时间、构造作用方式、构造变形方式、构造迁移方式、盆山耦合关系和构造作用的差异性等方面深入对比分析,缺乏从构造演化的过程来刻画事件本身的构造意义。

本文试图通过梳理青藏高原东部地区晚新生代重大构造事件的沉积地层记录、构造变形记录和岩浆响应等,来重新认识前人提出的青藏运动或横断事件、昆—黄运动(或元谋事件)、共和运动等构造事件发生的时限、构造作用方式和构造应力场演替历史,将构造事件与构造作用方式有机结合,全面刻画青藏高原东部地区晚新生代构造挤出历史及其构造地貌响应过程,建立青藏高原东部晚新生代挤出造山构造体系。

## 2 构造事件与地层不整合面

构造运动是指由地球内动力引起的岩石圈地质体变形、变位的机械运动、地震活动、岩浆作用、变质作用等地质过程的总称。根据其运动方式可以分为水平运动、垂直运动等。构造地层是大地构造和造山带研究中一个重要的概念,是指在一定地区、在一定构造发展阶段中所形成的地质体的组合,这个组合具有一定的构造形态、沉积建造、岩浆建造和变质建造等。在典型情况下,不同构造层之间为区域性不整合或假整合接触,即地层不整合成为划分构造层的重要标志。目前很多人所使用构造运动的概念仍沿袭了槽台构造旋回或褶皱旋回的思想,强调了大地构造发展的阶段性和周期性。定义构造运动的主要标志是沉积地层不整合接触关系。在传统的构造旋回理论中,地层不整合代表了强烈的褶皱事件,且褶皱作用的时间相对较短,构造的发展是相对平静时期与激烈运动时期的交替,每次更迭构成一个旋回。

现代大陆动力学研究要求将构造运动或造山作用作为一个过程来描述<sup>[37-38]</sup>,其中不仅有挤压造山作用,也有伸展断陷作用,同时还有挤压走滑作用等。因此从构造运动性质上,可以将构造事件进一步分为:伸展断陷作用(taphrogenesis),挤压逆冲褶皱作用、挤压剪切作用等,由此产生的盆地和构造变形组合是不同的。不同构造事件在时间上的演替便组成了构造事件序列,由此描绘了一个地区的构造运动的全过程及其演化历史。构造事件的地质记录是多方面的,包括沉积盆地中的沉积记录,如地层序列、地层不整合,砾石层、生长地层等;地层岩石中变形记录,如断裂构造变形(正断层、逆冲断层、走滑断层)、褶皱构造、韧性剪切变形、岩石

隆升剥露等;深部过程的岩浆记录等。而构造变形记录又可以概括为构造应力场及其演替过程,即从伸展应力场到挤压应力场的交替历史,由此产生的构造事件也可以称为伸展应力事件和挤压应力事件。而确定每一个构造事件、每期构造应力场发生的起始时代和结束时代,成为构造事件研究的核心内容。

在众多的确定一个构造事件或一次构造运动的地质标志中,地层不整合面是其中最重要的标志,代表一次激烈的褶皱作用,成为上、下两个不同构造层的划分界面。通常认为地层不整合记录了上、下两套地层之间的沉积间断或沉积缺失,这样的沉积地层不连续可以因水平挤压作用导致下套地层的褶皱构造变形,也可以是沉积盆地的整体抬升而引起的沉积间断或缺失。前者产生地层角度不整合,记录了一次水平挤压构造事件,后者为平行不整合,记录了垂向升降运动事件。不整合面之下的下套地层的顶界时代和之上的上套地层的底界时代记录了地层不整合所代表的沉积缺失或沉积间断时代。如何将这个不连续的地层界面与构造事件联系起来,成为构造事件地层学研究的关键问题。由于陆相沉积相变化大以及地层记录的不完整性,使得准确判定构造事件的起始时代变得困难。但有一点可以肯定,构造事件发生的时限与下套地层的沉积-剥蚀过程有关。因此,下套地层的沉积时代及其剥蚀过程的恢复是确定构造事件发生时间的关键。

“生长地层”概念(growth strata)可以帮助我们建立构造事件与沉积地层之间的时间联系。简单地说,生长地层是指与构造变动事件同时沉积的一套地层,即同构造期沉积地层,这套地层真正记录了构造事件发生的起始时间和结束时间。根据构造运动性质,可以分为同伸展构造生长地层、同挤压构造生长地层、同走滑构造生长地层等,前者往往伴随同沉积正断层发育,后者伴随同沉积逆冲断层或走滑断层发育。但对于陆相地层而言,如何识别生长地层不是一件容易的事情。在大型沉积盆地中,高精度的地震反射剖面能很好地识别生长地层,典型的例子如天山北缘与褶皱作用有关的晚新生代生长地层<sup>[39]</sup>、天山南缘库车凹陷<sup>[40-41]</sup>。

盆山耦合关系研究是确定重大构造事件发生

时限的重要途径。由于盆地的沉降与山脉隆升是一个统一的过程,盆地沉降伴随沉积作用,而山脉的隆升伴随岩石的剥蚀和剥露过程<sup>[42]</sup>。现代低温年代学测试技术的发展可以帮助确定山脉岩石隆升历史和剥露时代,这种方法在青藏高原东部得到了广泛的应用<sup>[43]</sup>。

### 3 青藏高原东部新构造格局

青藏高原东部是指喜马拉雅东构造结与青海湖连线以东的高原区,总体呈南北延伸,南北长约1500 km,东西宽约500 km,面积约750000 km<sup>2</sup>。该带大地构造上也称为“南北构造带”或“南北地震带”<sup>[44]</sup>,属于青藏滇缅印尼“歹”字型活动构造体系的组成部分<sup>[45]</sup>。该带在构造地貌上对应于青藏高原东部强烈的地形起伏地带,是中国两大水系(长江水系和黄河水系)的发源地,同时被这两大水系深切,形成了纵横交错的深切河谷地貌,地质灾害广泛发育,地质环境十分脆弱。

从新构造和活动构造角度看,青藏高原东部属于喜马拉雅-青藏高原新生代碰撞造山带的组成部分。印-欧大陆碰撞和持续陆内汇聚作用不仅导致宏伟的喜马拉雅山链的崛起,同时产生了宽阔的青藏高原的快速隆起。高原东部地区古老造山带,如祁连山造山带、西秦岭造山带、松潘-甘孜造山带、三江造山带、印支造山带等,在印-欧大陆碰撞过程中相继复活,卷入了新生代陆内造山过程,并形成了青藏高原东部地区复杂的、具有条块结构形态的构造地貌格局(图2,图3)。条块结构表现为南北分段性,被4条大型NWW-NW向走滑断裂带(海原断裂、东昆仑断裂、鲜水河断裂、红河断裂)分割为四个活动构造区,由北向南分别为:青藏高原东北隅川甘宁活动构造区、中部川青活动构造区、南部川滇菱形活动构造区、西南部保山-腾冲活动构造区。各区的基本构造地貌特征如下(图3)。

青藏高原东北隅川甘宁活动构造区:该区主体由西秦岭构造带、陇中地块和海原-六盘山断裂带组成,南侧以东昆仑断裂玛沁-玛曲-塔藏断裂为界,东界为NNW向六盘山断裂带,与鄂尔多斯地块接壤。地形地貌单元包括:西秦岭山地、临夏盆地、兰州盆地、积石山和拉脊山等。大地构造上属于祁连-秦岭造山带<sup>[46]</sup>。区内发育多条大型活动断裂,

包括:海原断裂、宁南弧形断裂束、六盘山断裂、马衔山断裂、西秦岭北缘断裂、临潭-宕昌断裂、白龙江断裂等。这些断裂活动性强,历史上记录了3次Ms≥8强震(1654年天水南地震、1920年海原地震和1927年古浪地震)、多次Ms≥7强震<sup>[47]</sup>。构造地貌上,南部西秦岭以高山、峡谷地貌为特征,北部以黄土谷地和丘陵为特征。

中部川青活动构造区:夹于北缘东昆仑断裂和南缘鲜水河断裂之间的三角形长条带,主体为巴彦喀拉三角形块体东部,大地构造上属于松潘-甘孜造山带的组成部分。东缘为著名的南北向岷山隆起带和北东向龙门山断裂构造带,构成了中国东西部地貌边界带<sup>[48-49]</sup>。该活动区内主要活动断裂有:NE向龙门山断裂带、SN向岷江断裂和虎牙断裂、NEE向青川断裂、NW向抚边河断裂、阿坝断裂等<sup>[50]</sup>。该区历史上发生多次强震,如:1879年武都南8级地震、1933年叠系7.5级地震、1976年平武7.2级地震、2008年汶川8级地震、2013年芦山7级地震等<sup>[51]</sup>。地形地貌上以高山、峡谷地貌为特征,旅游资源、水利资源非常丰富。

南部川滇菱形活动构造区:夹于南部红河断裂和北部、东部鲜水河-安宁河-则木河-小江断裂带之间的菱形块体,内部结构复杂<sup>[52]</sup>,由两个地貌单元组成,以北东向的锦屏山-金河-箐河断裂带为界,以西为高原区,属于松潘-甘孜褶皱带,主体由木里弧、盐源弧等构造组成;以东为攀西隆起带,出露扬子地台基底和盖层,发育南北向断层和褶皱构造,以深切河谷地貌为特征,安宁河-则木河-小江断裂带斜切该区,大凉山地区白垩纪-古近纪红色地层发生褶皱变形,形成南北走向的褶皱构造带。这些褶皱构造带又被NNW向断裂和NS向左旋走滑断裂所切割,沿断裂形成一系列断陷盆地。鲜水河-安宁河-则木河-小江断裂带为著名的地震断裂带,全长约1500 km,沿带至少记录了11次Ms>7历史强震<sup>[53]</sup>,而NW向红河断裂的活动性相对较弱。地块内部的活动断裂主要有:理塘断裂、中甸断裂、滇西北断裂带等,这些断裂均为地震断裂<sup>[54-55]</sup>。

西南部保山-腾冲活动构造区:位于红河断裂带西南的滇西南地区,向西与缅甸交界。该区作为三江构造带的组成部分,新构造和活动构造非常强烈,区内活动断裂发育,主要有南北向的怒江断裂、

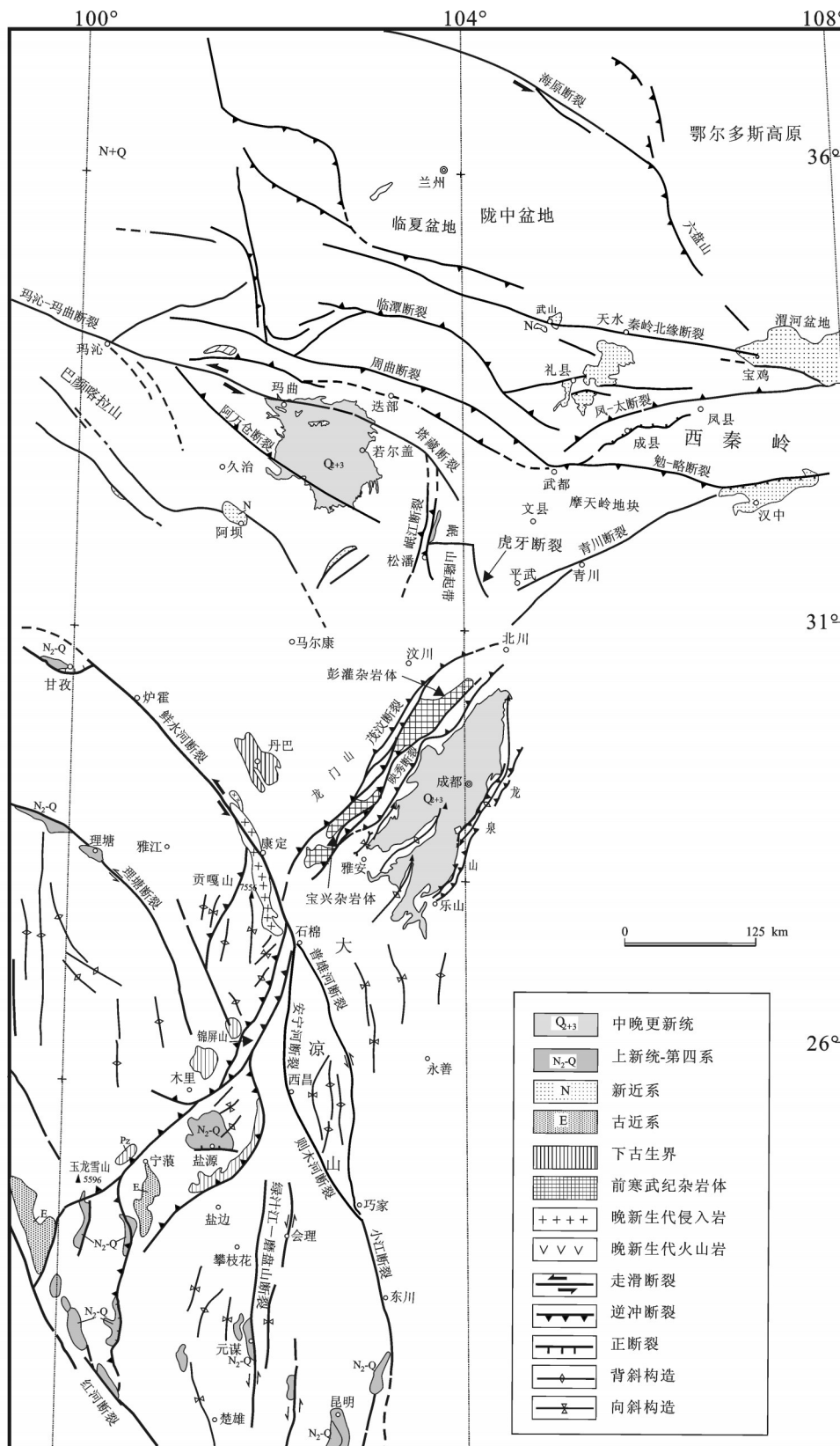


图2 青藏高原东部新生代地质构造简图  
Fig.2 Simplified map of Cenozoic structural geology in east Tibet

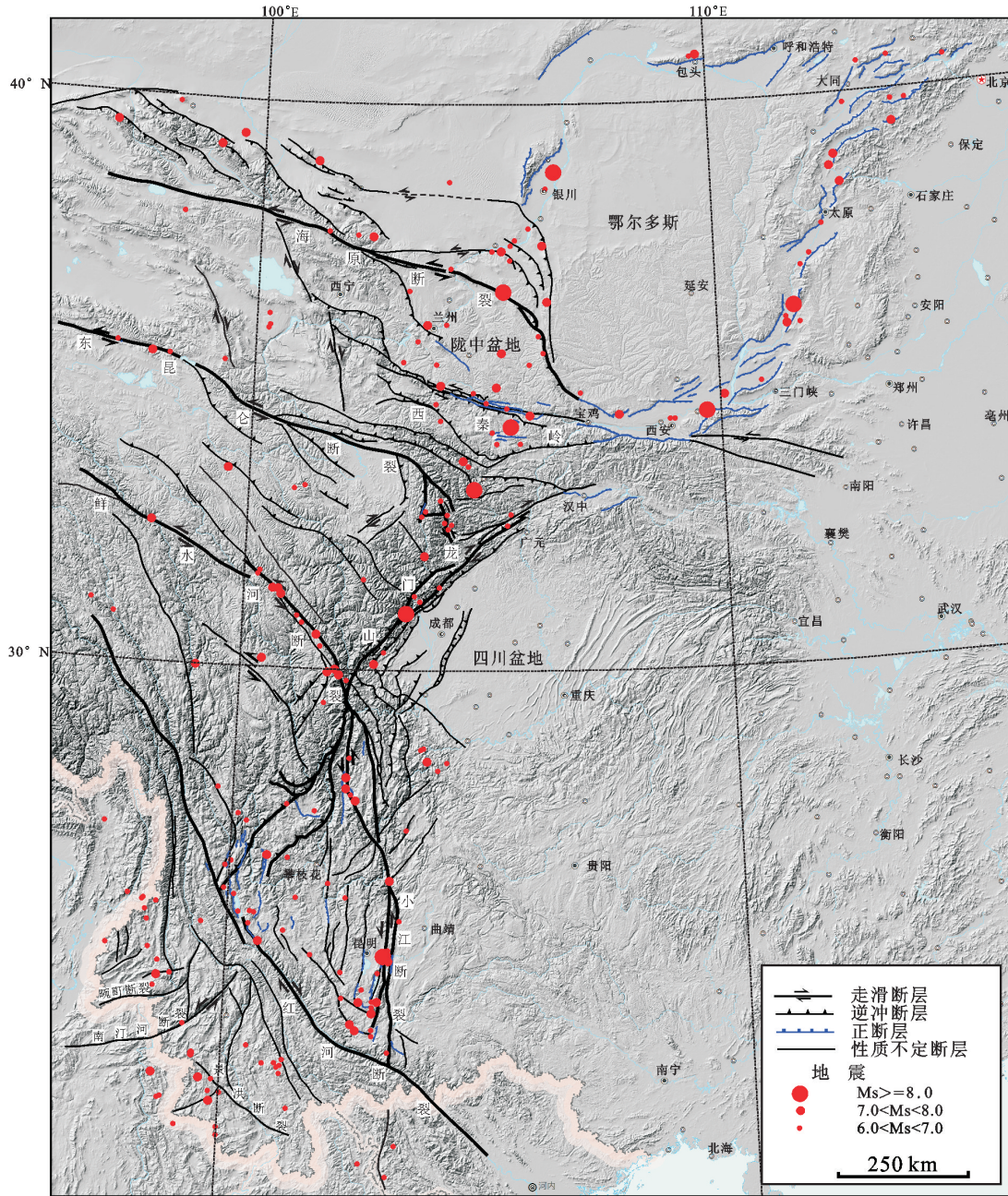


图3 青藏高原东部及邻区新构造与活动构造图  
 Fig.3 Neotectonic and active tectonic map of east Tibet and adjacent areas

北东向的畹町断裂、南汀河断裂、北西向的澜沧—景洪断裂等。历史上发生多次强震,最大地震震级为1976年龙陵7.3,7.4级地震<sup>[55]</sup>。

#### 4 青藏高原东部晚新生代重大构造事件的沉积记录

通过梳理分析青藏高原东北隅、川青地块和川滇菱形地块内部发育的晚新生代地层序列、地层不

整合和特征的砾岩层,阐述晚新生代重大构造事件及其发生的时限。

##### 4.1 青藏高原东北隅

青藏高原东北隅发育两类新生代盆地:新生代前陆盆地和新近纪断陷盆地。

新生代前陆盆地以临夏盆地为典型,兰州盆地也可能属于此类。临夏盆地新生代地层序列研究最为详细<sup>[56]</sup>,由上、下两套地层组成。下套地层为连

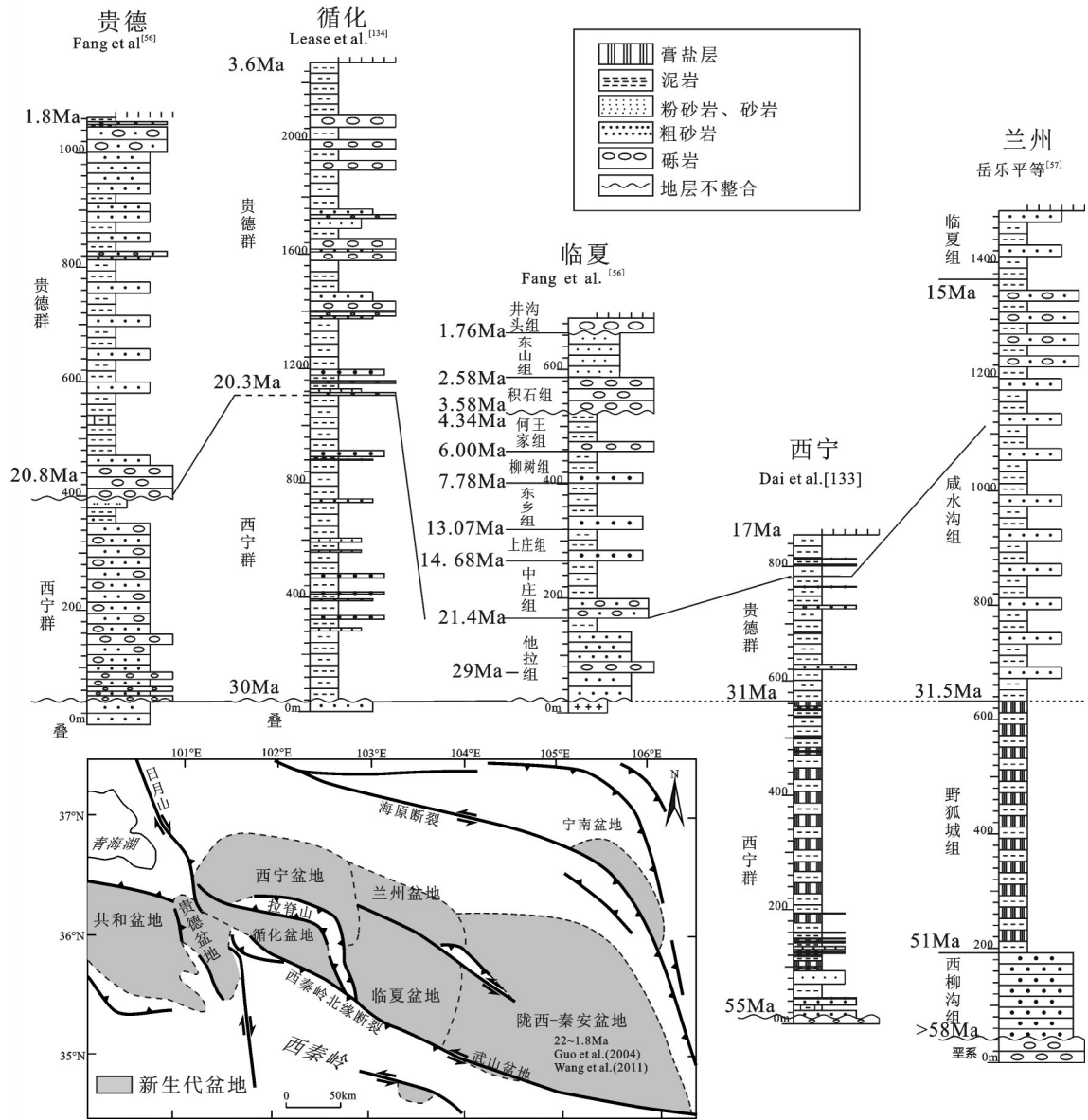


图4 西秦岭北缘地区新生代盆地与磁性地层柱状对比图  
 Fig.4 Correlation of magnetic lithostratigraphy of the Cenozoic foreland basins in northeast Tibet

续沉积的渐新世—新近纪河湖相地层,时代为29~3.7 Ma;上套地层为上新世砾岩层(时代为3.6~2.6 Ma)和早更新世湖相地层(时代2.6~1.7 Ma),砾岩层底部为显著的角度不整合接触,记录了一次重要的构造事件。兰州盆地是一个白垩纪—新生代沉积盆地,其中发育完整的新生代沉积地层<sup>[57]</sup>,为一套紫红色、红色河湖相含膏岩层砂泥岩。其中在中新世红黏土层上部出现了一套厚约30 m的砾石层,命名为五泉砾石层<sup>[58]</sup>,平行不整合在红黏土层之上,磁性地层学分析确定的沉积时代为3.5 Ma,

其上被第四纪黄河砾石层不整合超覆。

新近纪断陷盆地主要发育于西秦岭北缘和东部山区,典型的断陷盆地有:西和盆地、礼县盆地、盐关盆地、天水盆地、武山盆地、漳县盆地等(图5)。这些盆地受正断层控制,断层走向近EW,盆地中充填一套河湖相沉积地层,指示盆地形成与近南北向引张作用有关,但遭受晚期构造挤压反转,地层发生褶皱变形,并被晚第四纪黄土所覆盖。磁性地层学结果显示,武山盆地地层的沉积时代在15~6 Ma(上部不见顶)<sup>[59]</sup>。盐关盆地或天水盆地沉积有两套



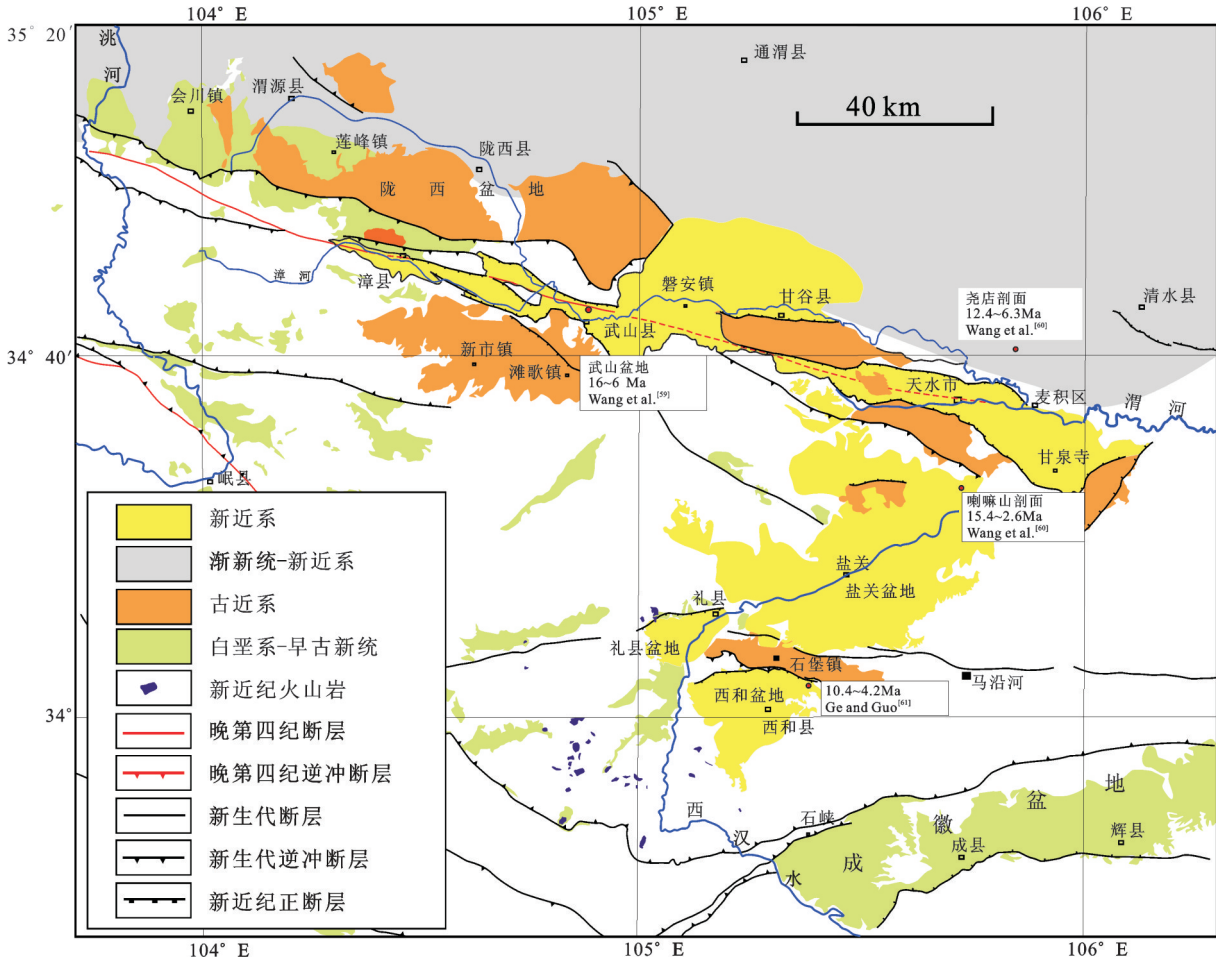


图5 西秦岭地区新近纪盆地分布与磁性地层年龄

Fig.5 Distribution of Neogene basins in West Qinling and magneto-stratigraphic ages

地层序列:下部一套沉积时代为 15.4~3.7 Ma,上部一套为 3.6~2.7 Ma<sup>[60]</sup>,之间为不整合接触。西和盆地沉积时代在 10.2~4.2 Ma<sup>[61]</sup>。

在上述2类盆地中,上新世地层中出现一个明显的不整合面,尤其以临夏盆地西部积石砾岩层底部不整合面最为典型。李吉均等<sup>[28]</sup>将此不整合面定义为青藏运动A幕,并认为该事件发生在 3.6 Ma 以来。前已述及,砾石层底部的不整合面记录了下套湖相地层构造挤压变形的地层记录,代表了青藏运动的挤压变形引起的地层间断或缺失,而不整合面之上发育的砾石层则反映了构造作用之后的沉积记录,更多地与当时构造地貌和气候有关<sup>[62]</sup>。可以肯定,临夏盆地西缘的积石砾石层的底部年龄限定了青藏构造事件的结束时代,青藏运动起始时间必然早于这个时间,这个推断已被盆地西缘积石山岩

体隆升剥露的低温年代学结果所证实<sup>[63]</sup>。另外,袁道阳等<sup>[64]</sup>在临夏盆地识别出中新世生长地层,并基于磁性地层测试分析结果,认为青藏事件起始于 7.8 Ma,并一直持续到 1.8 Ma。笔者在西和盆地的尧店组(9.2~7.4 Ma)中观察到同沉积正断层,推测断陷盆地构造挤压反转发生在大约 7.4 Ma 以来。

上述盆地分析表明,青藏高原东北隅在中新世时期经历了从早期引张应力场向晚期挤压应力场的转变过程,这种构造应力场的转变在六盘山地区也有记录<sup>[65-66]</sup>,转变的时间节点(7~8 Ma)代表了该地区青藏运动的起始时间,而地层不整合面之上的积石砾岩层则记录了该事件晚期的地貌-气候特征。

#### 4.2 川青活动构造区

该区新生代沉积盆地零星发育,晚新生代沉积

地层序列不完整,分布在川西高原的若尔盖盆地、岷江上游的漳腊盆地及其西侧山地、龙门山前陆褶皱构造带和成都平原等。

在若尔盖草原地区,地表出露一套红色砾岩层,地层发生挤压褶皱变形,其地层时代不明,推测为古近纪。在若尔盖草原上实施的2个环境钻孔揭示该盆地主要充填了第四纪中、晚更新世砂泥岩沉积和全新世泥炭层,地层连续,没有发现沉积间断或不整合现象<sup>[67-68]</sup>。在岷江上游的漳腊盆地,充填的地层为中更新世砾岩、砂泥岩和晚更新世—全新世河流阶地堆积<sup>[69-70]</sup>。在盆地西侧的山地,发育2套地层,一套为砾岩层,已经发生褶皱变形,以向斜的形式保留,地层时代推测为中新世;另外一套为黑色、黄褐色泥岩夹砂岩层,该套地层也发生挤压变形<sup>[60]</sup>。在朶米寺的一个钻孔中,在中生代灰岩之下钻遇这套厚120 m的砂泥岩,被逆冲在灰岩之下。这套地层的时代可能为上新世—早更新世,可与昔格达组地层对比<sup>[71]</sup>。

在龙门山前陆褶皱构造带和成都平原地区,沉积了2套砾岩层:一套为大邑砾岩,不整合堆积在褶皱了的中生代地层之上,砾岩层本身已发生挤压变形。该套砾岩层中砾石出现了彭灌杂岩体的成分,表明砾石沉积时,杂岩体已剥露地表,成为该砾石层的主要物源。前人对这套砾岩层的沉积时代做了探索性研究,主要基于碎屑物ESR测年和宇宙核素埋藏年龄,认为其地质时代为上新世<sup>[72-73]</sup>。另外一套是雅安砾岩层,地质时代为中更新世,该套砾岩层呈水平状,没有发生明显的挤压变形<sup>[49]</sup>。

以上分析可知,川青活动区及其龙门山前陆地发育的晚新生代地层序列清楚地记录了晚新生代2期重要构造事件:早期事件发生在上新世之前,可与东北隅的青藏运动A幕相当,上新世—早更新世大邑砾岩代表了这次挤压构造事件的晚期沉积响应;晚期事件发生在早、中更新世之交,与昆黄运动相当,成都盆地雅安砾石层是对这次事件的沉积响应。

#### 4.3 川滇菱形活动构造区

该地区发育2类断陷盆地:一类发育于盐源—丽江逆冲推覆构造带的高原区,统称为滇西北断陷盆地,地层属于盐源—丽江分区;另一类发育于东部南北向断陷盆地或谷地中,以安宁河谷地、元

谋盆地、小江断裂带断陷盆地为典型。

滇西北断陷带由多个断陷盆地组成,其中最重要的盆地有:程海盆地、丽江盆地、弥渡盆地、洱海盆地、鹤庆盆地等。盐源盆地位于金河—箐河断裂上盘,是一个近东西走向的断陷盆地,受到南侧和西南侧2条正断层控制,伸展方向为NE-SW向。其中发育2套新生代沉积地层。下部一套为古近纪砾岩层,这套地层主要残留在盆地的周边地区,相当于丽江组;上部一套为新近纪—第四纪含煤层的河流相、湖沼相沉积,命名为盐源组,沉积厚度在500~800 m。在这套地层中,发现上新世和早更新世2个时期的哺乳动物化石<sup>[74]</sup>。卢海建等<sup>[75]</sup>通过磁性地层学研究,确定上部含煤地层沉积时代起始于3.6 Ma之前,于中更新世(0.6 Ma)结束,地层时代相当于上新世晚期至早、中更新世。在程海、大理、丽江地区发育的盆地有2个走向:一个为近南北向,基本沿断裂带发育,是基底断裂伸展复活的结果;另一类为NW-SE向,与红河断裂带平行。在这些断陷盆地中充填的沉积物主要为一套河湖相地层,不同作者给出的地层时代不一样。Wang et al.<sup>[76]</sup>认为大理断陷盆地的地层开始沉积时代为约4 Ma;肖海峰等<sup>[77]</sup>给出了鹤庆盆地钻孔的古地磁底界年龄为2.78 Ma;Li et al.<sup>[78]</sup>也基于古地磁分析结果,认为三营组地层古地磁底界年龄为7.6 Ma。

元谋盆地是南北向断陷盆地的典型代表。该盆地因发现大量的哺乳动物化石和智人牙齿化石而闻名中外,并做了大量的古生物学、地层学、地层年代学的研究工作<sup>[34, 79-82]</sup>。元谋盆地内充填一套河湖相沉积地层,前人将其命名为元谋群,并细分为几个组,其上为中更新世河流相砂砾层所超覆,两者之间为角度不整合接触,记录了一次重要的构造事件,命名为元谋运动<sup>[34]</sup>。这次构造事件发生的时代取决于元谋群的时代。哺乳动物化石研究认为元谋群时代为上新世至早更新世<sup>[82]</sup>。磁性地层学研究给出了不同的结果。许多研究者认为元谋群地层时代起始于上新世晚期,距今3.9~3.6 Ma,结束于早更新世晚期或中更新世早期,距今0.8~0.7 Ma<sup>[80, 83-86]</sup>。而岳乐平等<sup>[87]</sup>给出的含古猿化石的磁性地层时代为8.2~7.1 Ma。区域上,元谋组可以与安宁河河谷地区发育的昔格达河湖相地层对比,属于同一时代的沉积地层<sup>[88]</sup>。

沿安宁河断裂谷发育的昔格达组河湖相地层及其变形特征很好地记录了上新世—第四纪构造事件。磁性地层学研究结果显示,这套湖相沉积地层起始于上新世至早更新世期,时间在4.2~2.6 Ma<sup>[89]</sup>,但由于遭受后期剥蚀,地层顶部保留不完整。在局部地区,顶部出现一套磨圆良好的砾石层。这套地层已发生挤压变形,局部地区地层陡立,其上被中更新砾岩层所覆盖,指示了早、中更新世之间的一次挤压构造事件<sup>[90]</sup>。

川滇地区上新世晚期至早更新时期堆积的砾岩层和广泛发育的河湖相断陷盆地,指示了青藏高原东部地区差异性构造地貌的形成和伸展作用的主导地位,代表了一个构造松弛时期,这个时期因地壳增厚产生的重力垮塌导致沿重要断裂带发生伸展断陷。而早、中更新世之间的地层不整合面记录了一次重要的构造挤压事件(元谋运动),其发生时代大致与东北隅的昆—黄运动同时。

## 5 晚新生代重大构造事件的变形记录

青藏高原东部晚新生代构造变形记录了重大构造事件的地壳运动方式、构造过程和运动幅度。这种变形主要表现为沿NWW—SEE向大型断裂带的左旋走滑运动与剪切变形、沿近南北向断裂的逆冲运动和地块隆升等。

### 5.1 断裂带左旋走滑运动与剪切变形

如前所述,青藏高原东部被一组NWW—SEE向大型断裂带切割成几个活动块体。自南而北,这些断裂包括:红河断裂、鲜水河断裂、东昆仑断裂、西秦岭北缘断裂、海原断裂等(图3)。这些大型断裂带在青藏高原内部物质向东的构造挤出过程中扮演了重要的作用。构造地貌和地质证据显示,除了红河断裂以外,其它断裂在晚新生代以来发生左旋走滑运动,沿断裂带累积了规模不等的左旋走滑位移量。

红河断裂是一条大型左旋剪切走滑断裂,前人的研究主要集中在哀牢山剪切带糜棱岩的年代学测试分析、左旋走滑韧性剪切变形时代和走滑距离等。研究认为该剪切带走滑变形主要发生在渐新世至中新世早期(32~17 Ma)<sup>[91-95, 76]</sup>。但构造地貌和活动断裂研究发现,自中新世晚期以来,该断裂运动方向转换为右旋走滑剪切变形,沿断裂带的水系发生一致的右旋转折<sup>[96-99]</sup>,走滑速率在1~2 mm/a。

根据越南红河盆地地震反射剖面资料,红河断裂右旋走滑剪切变形于上新世时期停止活动<sup>[100]</sup>,但具体时代无法精确确定,一般认为在5~3 Ma以来。

鲜水河断裂是一条大型的左旋走滑活动断裂带,现今走滑速率在7~10 mm/a<sup>[53]</sup>。向南东延伸与安宁河—则木河—小江断裂构成了川滇地块的东部边界。鲜水河断裂晚新生代以来的走滑运动错动了中生代岩体、扬子基底、二级水系等地质地貌标志,西段最大累积的左旋走滑位移量估计为78~100 km,康定段约为60 km<sup>[101]</sup>,安宁河—则木河段为13~14.5 km<sup>[102]</sup>,小江段为30 km<sup>[35]</sup>。该断裂的左旋走滑活动也使中新世折多山岩体(岩体结晶年龄为20~14 Ma)发生韧性剪切变形,矿物组构特征(S—C组构、旋斑等)清楚地指示左旋剪切指向<sup>[103]</sup>。韧性剪切带中的云母Ar—Ar测年结果指示了多期次的冷却事件,其中白云母的<sup>39</sup>Ar—<sup>40</sup>Ar坪年龄给出了剪切带起始活动时间为12 Ma,而黑云母的<sup>39</sup>Ar—<sup>40</sup>Ar坪年龄指示该剪切带在4~6 Ma发生快速冷却<sup>[104]</sup>。

东昆仑断裂也是一条大型的活动左旋走滑活动断裂带,全长超过1500 km,沿断裂带保留清楚的历史地震地表破裂形迹<sup>[105-107]</sup>。在阿尼玛卿山以西,晚第四纪断层走滑速率恒定在10~12 mm/a<sup>[108-111]</sup>,向东玛沁—玛曲段,走滑速率降为5~3 mm/a<sup>[112-114]</sup>。该断裂晚新生代走滑活动错断了古近纪沉积盆地、白垩纪盆地和黄河水系<sup>[115]</sup>。研究发现,沿东昆仑断裂带中段(昆仑山口至阿尼玛卿山段),根据错移的古近纪盆地复原结果指示累计左旋位移量达125 km,而沿玛沁—玛曲段,据白垩纪盆地错移和黄河水系的转折恢复的累计左旋位移量在60~45 km。这种位移分布特征指示阿尼玛卿山的逆冲隆升吸收了至少60 km的位移量,而东缘岷山隆起带晚新生代以来至少累积了60 km的地壳缩短量。根据昆仑山口以西的断裂西段发育的火山岩年龄,推断东昆仑断裂左旋走滑起始时间在9~12 Ma。

西秦岭北缘断裂是一条活动的左旋走滑断裂,全长约380 km,现今活动速率在1~2 mm/a。根据错断的地质体和地区一级河流水系错移,沿断裂带累积的左旋走滑位移量在3.6~4.1 km。

海原断裂断裂带因1920年10月25日发生的海原M8.5地震而闻名中外,同震地表破裂沿断裂带清楚可见。这是一条快速活动的走滑断裂,活动速率

在6~10 mm/a。断裂的左旋走滑活动使黄河河道发生沿断裂带转折,估计走滑位移量大于10 km。

## 5.2 断层逆冲作用与东缘地块隆升剥露

上述青藏高原东部近东西向活动断裂带晚新生代左旋走滑运动调节了高原东部地壳块体向东运动,这些运动位移量大部分通过逆冲断层作用转换成地壳水平缩短而被吸收<sup>[52]</sup>,使青藏高原东部地区快速隆升,并在青藏高原东缘形成近南北向山链,著名的有六盘山、岷山、龙门山、锦屏山、大凉山等。另有一小部分运动可能穿越东缘边界,继续向东传播,使华北地块、四川盆地内部发生构造变形,形成如龙泉山等NNE向褶皱山链<sup>[116-118]</sup>。

低温年代学测年技术,尤其是磷灰石裂变径迹和U-Th/He测年方法可以帮助确定这些年轻山链快速隆升的时代和岩石剥露历史,并取得了重要的进展。龙门山构造带由2个基底杂岩体组成,即彭灌杂岩体和宝兴杂岩体,它们构成了龙门山中央构造带主体。Arne et al.<sup>[119]</sup>对这两个杂岩体开展了磷灰石裂变径迹测年,发现这2个杂岩体至少在7~5 Ma开始快速隆升。Kirby et al.<sup>[120]</sup>运用U-Th/He测年技术,进一步确定了龙门山构造带快速冷却时代。这些作者推测,龙门山构造带快速剥露的起始时间不会早于13~12 Ma,很可能发生在5~6 Ma以来。Wang et al.<sup>[121]</sup>对彭灌杂岩体的九顶山高程剖面开展了锆石、磷灰石裂变径迹和U-Th/He测年研究,利用这些测年结果模拟时间-深度历史,发现2期热历史与总的低温年代学结果是一致的:早期(30~25 Ma)快速隆升紧随慢速剥露,晚期(10 Ma以来)的快速隆升。这个结果与早期磷灰石裂变径迹和U-Th/He测年结果基本一致,也与秦岭北缘山地快速隆升事件年龄一致<sup>[122-123]</sup>,表明龙门山断裂带最近一期逆冲作用起始于10 Ma以来,并在上新世时期中央杂岩体剥露地表,成为山前大邑砾岩层的主要物源。

呈南北向展布的岷山隆起带是青藏高原东缘年轻的山链,夹持于西侧岷江断裂和东侧虎牙断裂之间,最高峰雪宝顶海拔5588 m。北侧为塔藏断裂带。晚新生代的逆冲断裂作用导致该带快速隆升,吸收了川青地块向东挤出。有限的磷灰石裂变径迹和U-Th/He测年结果显示,该断块快速隆升起始于7~4 Ma<sup>[120]</sup>,与龙门山中央隆起带具有相似的隆升历史。

Lease et al.<sup>[124]</sup>运用磷灰石裂变径迹和U-Th/He方法研究了西秦岭北缘断裂带拉脊山和积石山隆起带的隆升历史,结果发现这两个不同走向的隆起带经历了不同的隆升历史。呈东西走向的拉脊山隆起带的快速隆升发生在13 Ma之前,而呈近南北走向的积石山隆起带的快速隆升发生在13 Ma之后。这个结果指示青藏高原东北隅在晚新生代发生了运动学转换,最新构造活动受控于东西向的逆冲作用。郑德文等<sup>[62]</sup>的研究发现,积石山隆升起始于8 Ma,而盆地中积石砾岩层沉积时代为3.6 Ma。

六盘山断裂带由西向东的逆冲活动使断层上盘白垩纪地层发生褶皱变形,形成六盘山隆起带。Zheng et al.<sup>[125]</sup>通过横穿六盘山隆起带白垩系碎屑磷灰石的裂变径迹,发现该山脉快速隆升起始于约8 Ma,这个结果与青藏高原东缘测试结果一致。

在川滇地块东北缘的折多山地区发育中新世花岗岩体。磷灰石裂变径迹测年结果指示岩体于中新世晚期约13 Ma、7 Ma发生快速隆升<sup>[126]</sup>。Clark等<sup>[127]</sup>对深切河谷剖面的磷灰石U-Th/He测年结果揭示了该地区在9~10 Ma快速隆升事件,这个结果与鲜水河断裂带剪切变形的Ar-Ar测年结果非常一致,共同记录了该地区中新世晚期以来的地壳构造挤出和增厚事件。

## 6 晚新生代重大构造事件的岩浆记录

青藏高原东缘晚新生代岩浆活动不显著或出露很少,目前仅在鲜水河断裂折多山地区发现了与断裂活动有关的花岗质岩脉。野外调查发现,这些花岗质岩脉或侵位于古近纪的混合岩带,或侵位于新近纪岩体之中,呈细脉状产出,主要为细粒花岗岩。锆石U-Pb SHRIMP测年结果给出了3个结晶年龄:约10 Ma, 5~7 Ma, 3.7 Ma(未发表的资料)。这些年龄与花岗岩韧性剪切带的云母<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar年龄结果一致,记录了断裂带同剪构造作用形成的地壳局部熔融。这也是迄今在青藏高原东部发现的最年轻的花岗质岩脉。

## 7 青藏高原东部晚新生代阶段性构造挤出造山历史

### 7.1 青藏高原东部晚新生代阶段性演化历史

综合青藏高原东部地区晚新生代盆地沉积记

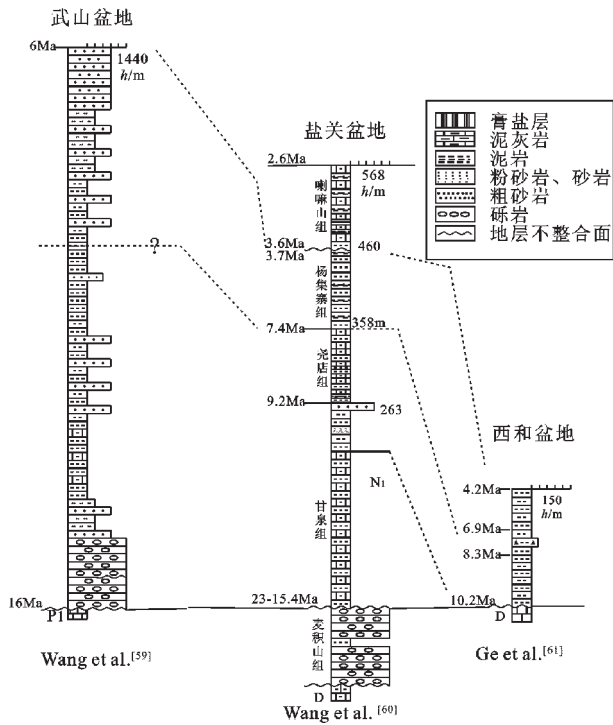


图6 西秦岭地区典型新近纪盆地地层柱状与磁性地层时代  
Fig. 6 Typical lithostratigraphy and magneto-stratigraphic ages of the Miocene basins in West Qinling

录、地层不整合关系、大型走滑断裂带剪切变形的<sup>39</sup>Ar-<sup>40</sup>Ar年代学、东缘年轻山系和深切河谷的磷灰石裂变径迹和U-Th/He测年、年轻花岗质岩脉锆石U-Pb测年结果,一致地揭示了该地区强烈构造活动起始于中新世晚期约12~8 Ma(图9)。盆地中或山前地带发育的上新世晚期砾岩层(临夏盆地的积石砾岩、龙门山前陆带的大邑砾岩、兰州盆地的五泉砾岩等)则指示了高原东缘巨大地形地貌高差的出现。这次构造事件即被前人命名为青藏运动<sup>[26-29]</sup>或横断事件<sup>[32-33]</sup>,其起始时代在不同地段不完全同时,但大致发生在12~8 Ma时间区间范围内。青藏高原东缘和西南缘于晚上新世至早更新世发育的伸展断陷湖盆标志着青藏运动的结束,青藏高原东部地区构造演化进入了一个构造相对松弛阶段,引张构造应力场占据主导地位,这个阶段代表了青藏运动后东缘地带造山垮塌伸展,伸展作用总体表现为南段强、中北段弱。根据现有的磁性地层学研究结果,这个阶段起始于约3.6 Ma,结束于约1.1 Ma。自早更新世晚期开始,该地区又进入了一个新的构造演化阶段,上新世晚期至早更新世发育的伸展断

陷湖盆遭受挤压,局部地区出现构造反转,该事件即昆黄运动或元谋运动,根据地层的接触关系和磁性地层学研究结果,其发生的时代在1.1~0.6 Ma<sup>[30]</sup>,持续时间相对较短。中更新世又出现了一个构造相对松弛阶段,在青藏高原东缘局部地带发育规模较小的山间断陷盆地,如岷江上游的漳腊盆地、安宁河谷地等,该伸展阶段持续时间不到500 ka<sup>[128]</sup>。自晚更新世以来(约120 ka),区域构造应力场再次发生调整,挤压作用再一次占据主导地位,前人将这个阶段命名为最新构造变动阶段<sup>[36]</sup>,或共和运动<sup>[29]</sup>。现今活动构造正是这个阶段的延续。

根据青藏高原东部晚新生代构造变形记录、构造隆升记录和沉积记录等,拟将该地区晚新生代以来的构造演化划分为三个主要阶段(阶段I, II, III,图9),每个阶段均由早期的伸展期和晚期的挤压期组成,从伸展作用到挤压作用的转换分别发生在12~8 Ma、1.1 Ma、0.12 Ma,对应于青藏运动、昆黄运动、共和运动的起始时间。从已确定的地质时代来看,新构造演化呈阶段性发展,构造挤压和构造伸展交替发生,但挤压构造作用阶段的持续时间可以长达几个百万年,也可以短到不足一百万年、甚至几十万年。

### 7.2 青藏高原东部晚新生代挤出造山构造体系

青藏高原东部晚新生代构造变形的最显著特征是沿块体边界断裂的几十千米的左旋走滑运动和东缘强烈逆冲推覆作用。横穿东缘龙门山的深地震反射剖面证实了大型逆冲断层和推覆构造的存在<sup>[129]</sup>。这个变形样式可以概括为地壳物质向东挤出及其挤出造山作用,即西南部的川滇地块、中部的川青地块、东北隅的陇中地块等均有序地向南东、向东以及向北东挤出,地块挤出受到NWW向左旋走滑断裂调节,并在挤出过程中,块体内部发生逆冲褶皱变形,导致块体自身地壳增厚。大部分向东运动转化为东部地带地壳缩短变形,东缘的六盘山、岷山、龙门山、锦屏山、大凉山等南北向山系快速隆升(图10),尤其是扬子基底卷入逆冲作用,导致宝兴、彭灌等杂岩体的快速剥露,由此形成了东缘复杂构造地貌边界带。同时,地块向东挤出超越了东缘边界,向东传播到四川盆地,使扬子地块盖层沿三叠纪膏盐层发生滑脱,在四川盆地内形成NE-SW向褶皱构造,如熊坡、龙泉山等褶皱构造。

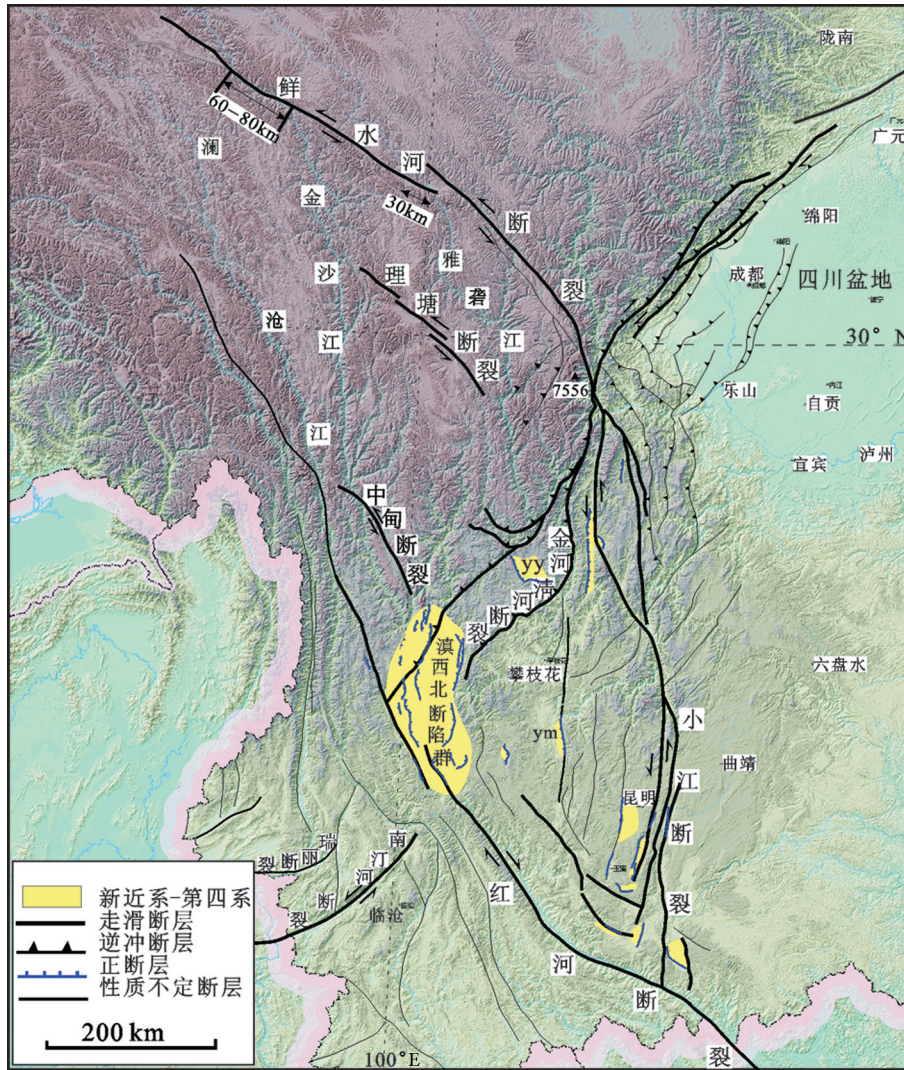


图7 川滇菱形活动构造区新构造与活动断裂分布图(yy—盐源盆地;ym—元谋盆地)图中数值代表水系沿断裂错断距离  
 Fig. 7 Neotectonics and active faults in the Chuan-Dian active zone. yy: Yanyuan basin; ym: Yuanmu basin. Kilometric numbers indicate the distance of offset streams along fault zones

显然,上述构造挤出造山作用模式不同于早期认为的刚性块体挤出模式,青藏高原东部地壳不是传统的刚性地块,在其向东挤出过程中,块体内部地壳物质通过挤压缩短变形导致地壳增厚,向东的挤出位移量总体上被块体内部不同方向的地壳增厚作用所吸收,即地块挤出作用伴随着挤压造山作用,这2个过程是相辅相成、相伴而行。从走滑位移量分布特征来看,青藏高原东部晚新生代挤出造山过程不具有连续变形分布模式,而更具有阶梯状分布特征,即地块内部挤压缩短作用发生在几个主要的构造带上。

从构造演化角度来看,青藏高原东部挤出造山作用与东缘地貌边界带主体定型于新近纪晚期发生的青藏运动时期,也即青藏运动或横断事件是青藏高原东部构造地貌形成的最重要阶段。沿东昆仑断裂带中段大约125 km左旋走滑量,大部分是在中新世青藏运动时期累积的。该构造运动也使青藏高原东部快速隆升,于上新世时期进入了冰冻圈,普遍发育冰川,在深切河谷中普遍加积了300~400 m厚的冰水沉积(昔格达湖相地层),也表明现今的深切河谷地貌格局在上新世之前就已经基本定型<sup>[130]</sup>。上新世—早更新世时期的伸展作用使高

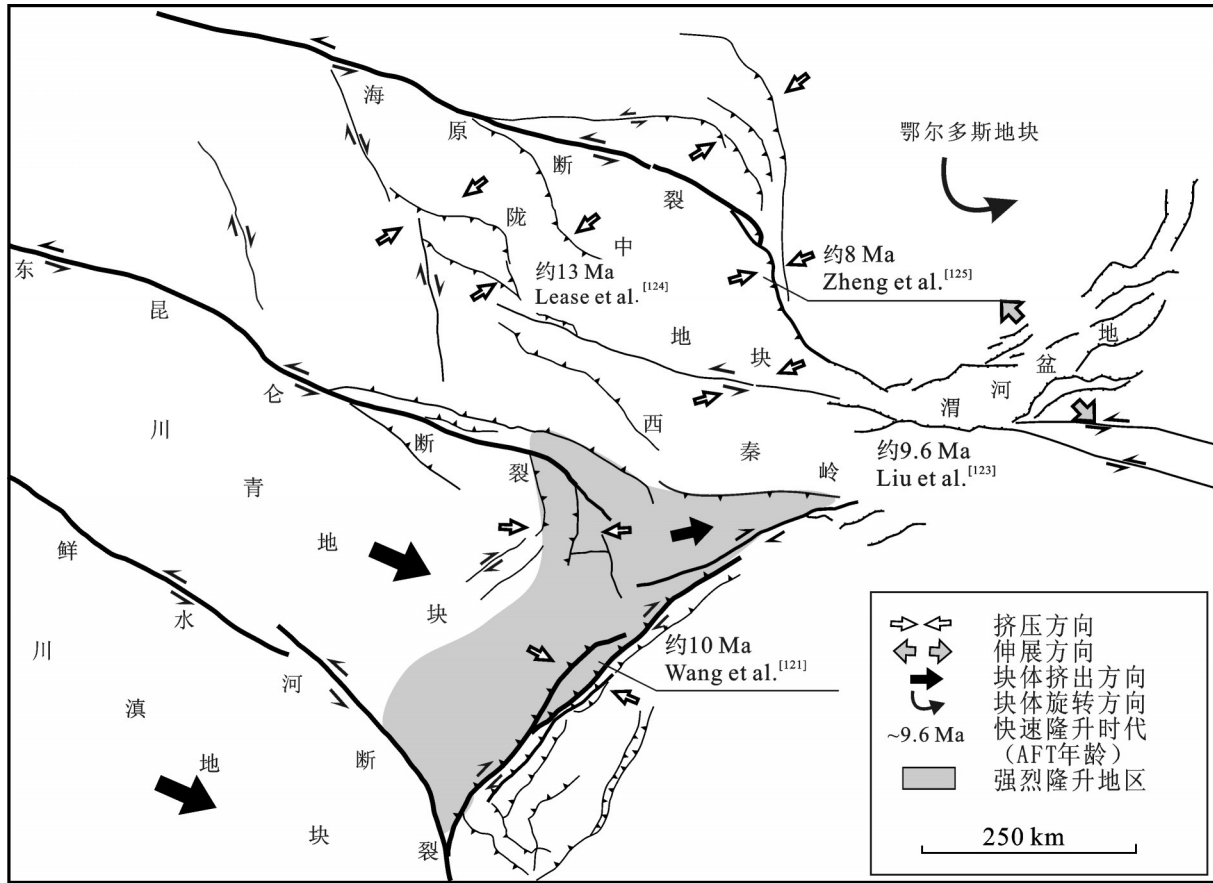


图8 青藏高原东部中北段主要年轻山系快速隆升时代分布图(其他图例同图2)  
 Fig. 8 Distribution of active faults and uplift zones in central north part of east Tibet

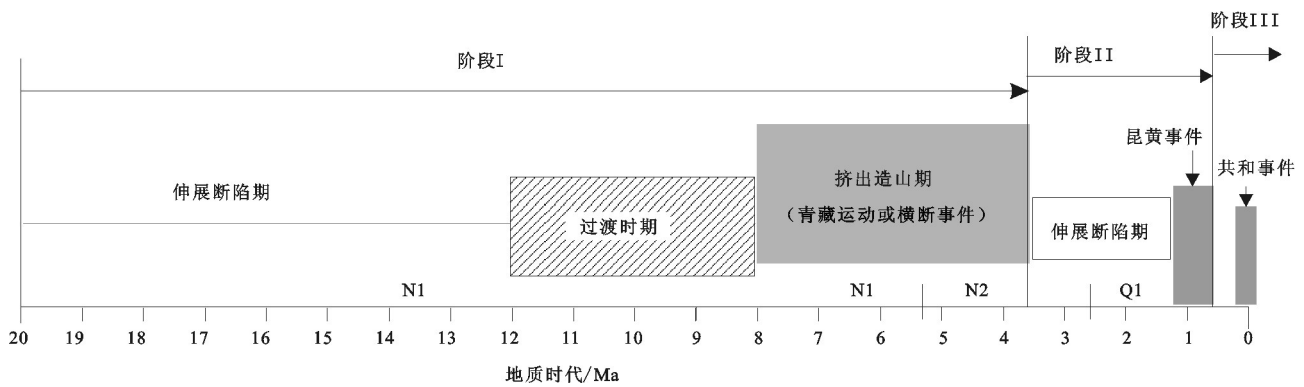


图9 青藏高原东部地区晚新生代主要构造演化阶段示意图  
 Fig. 9 Scheme showing episodes and main tectonic events during late Cenozoic in east Tibet

原东部普遍发育的夷平面发生解体,从而出现了现今所见的山间断陷盆地地貌。发生于早中更新世以来的昆黄事件(或元谋事件)和共和事件,因持续时间相对较短(<1 Ma)对现今构造地貌格局形成的

贡献相对较小,但昆黄事件可能使青藏高原东北隅进一步隆升而进入了冰冻圈,从而发育了中更新世冰碛物(昆仑山望昆组冰川沉积)<sup>[30,31]</sup>。这次构造事件也使龙门山构造带进一步抬升,构造与气候的耦

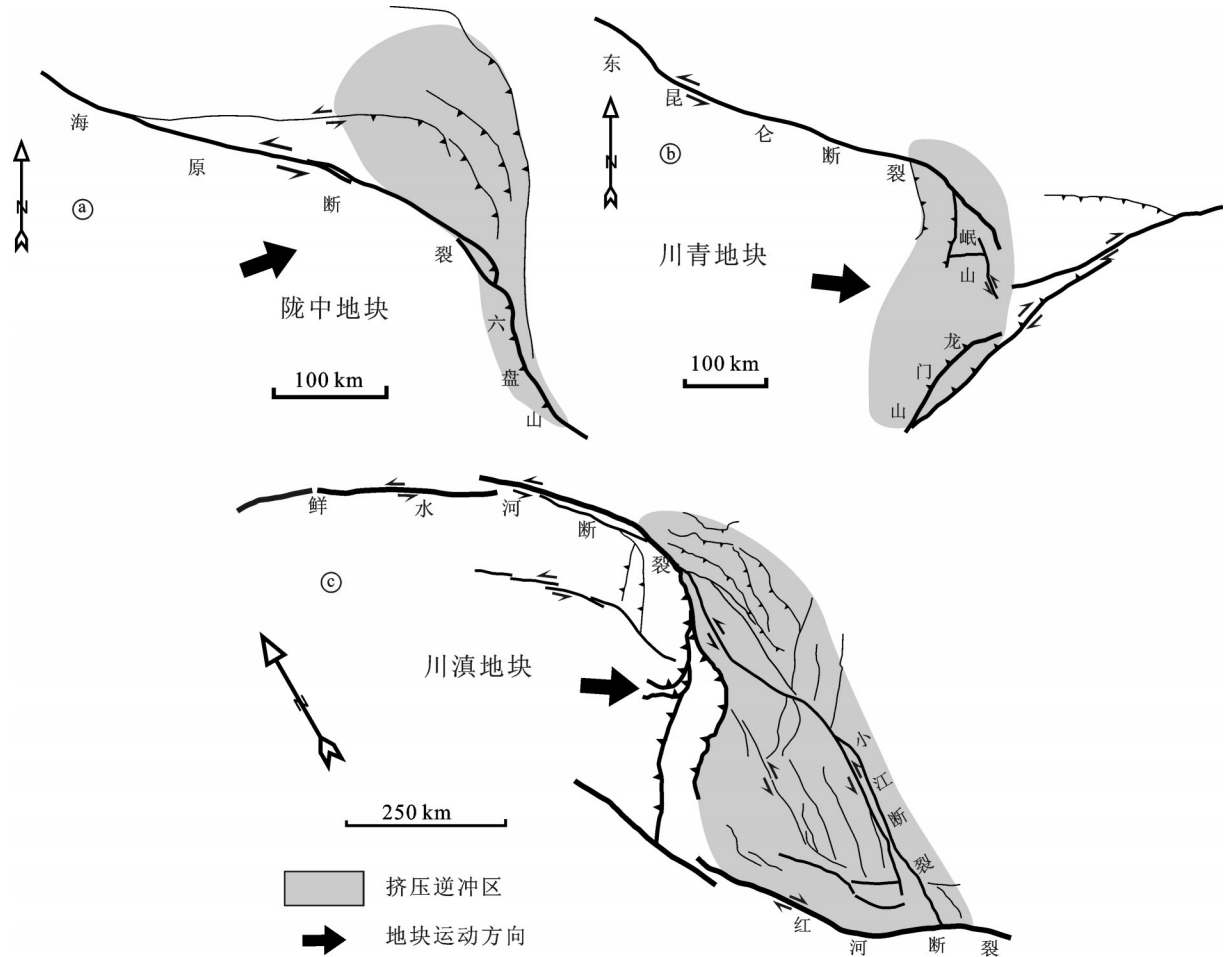


图10 青藏高原东部地区左旋走滑与挤出造山作用对比图(其他图例同图2)

a—海原断裂左旋走滑与东端宁南弧形褶皱带与六盘山逆冲断裂带;b—东昆仑断裂左旋走滑运动与东端岷山—龙门山逆冲构造作用;  
c—鲜水河断裂左旋走滑运动及其东端逆冲褶皱作用

Fig. 10 Comparison of sinistral strike-slip faulting and extrusion-related orogenic systems in east Tibet

a-Haiyuan sinistral strike-slip fault and its eastward transfer into the south Ningxia curved fold zone and to the Liupan Shan fault zone;  
b-East Kunlun sinistral strike-slip fault and its eastward transfer to oblique thrusting along the Minshan and Longmenshan fault zone.  
c-Xianshuihe sinistral strike-slip fault and its eastward transfer to crustal thrusting and folding

合在龙门山前陆的成都平原堆积了雅安砾石层。

### 7.3 最新构造变动样式

与青藏运动阶段相比,最近 120 ka 以来的最新构造变动阶段,相对于新构造演化历史,其持续时间很短,但这个活动构造阶段主导了现今地壳运动,且青藏高原东缘块体运动学和变形样式出现了明显的差异或分化。以川滇地块为例(图 11),活动断裂运动学研究结果表明<sup>[55]</sup>,川滇菱形地块表征为由川滇外弧带和滇西内弧带组成的双弧形旋扭构造,围绕东喜马拉雅构造结发生顺时针旋转。外弧带由鲜水河—安宁河—则木河和小江断裂组成,左旋走滑运动;内环由中甸—滇西北裂谷—南汀河断

裂组成,也以左旋走滑运动为特征,这个运动学样式与现今 GPS 结果非常吻合<sup>[131]</sup>,但与中新世晚期青藏运动时期发生的向东挤出造山作用模式完全不同(图 11-a)。围绕东喜马拉雅构造结弧形旋扭构造暗示该地区受到下地壳流动的深部过程控制,大地电磁测深资料和研究结果支持这种下地壳流模型<sup>[132]</sup>。川青活动地块向东挤出造山作用伴随着东缘龙门山断裂带的右旋走滑运动和块体逆时针旋转,这种运动学趋势也为 GPS 测量结果所证实。

青藏高原东北隅块体运动学相对比较复杂。南侧为西秦岭北缘断裂以左旋走滑运动为主,兼有逆冲分量,北侧海原断裂也以左旋走滑运动为主,



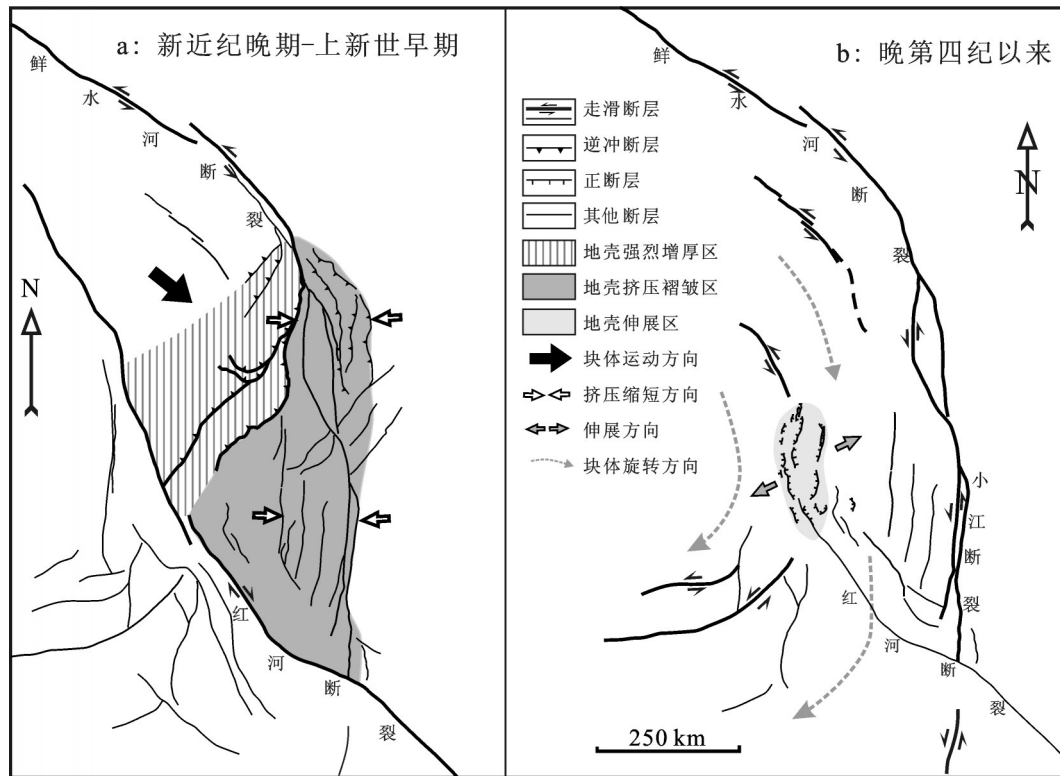


图 11 青藏高原东部西南段晚新生代块体运动学及其转换

a—新近纪晚期—上新世早期块体挤出构造和东部挤出造山作用;b—晚第四纪以来围绕喜马拉雅东构造结的顺时针旋转运动

Fig. 11 Change in block kinematics of the southwest part of east Tibet during Late Cenozoic

a—Late Miocene to Early Pliocene extrusion-related orogenic system; b—Clockwise rotation around the east Himalaya syntax and sinistral strike-slip faulting in late Quaternary

宁南弧形褶皱带则具有明显的逆冲分量。在这 2 条左旋走滑断裂之间还有一条断裂,即庄浪河—马街山断裂,以挤压逆冲为主,兼有右旋走滑分量。从构造演化角度,早期以 NE-SW 向挤压缩短为主,晚期以走滑活动为主。

## 8 结 论

本文通过综合分析沉积盆地地层序列和地层不整合关系、地块边界断裂走滑错动和走滑位移量、剪切变形的  $^{39}\text{Ar}-^{40}\text{Ar}$  测年结果、基底隆起带和年轻山系的磷灰石裂变径迹和 U-Th/He 测年结果等,结合断陷盆地的发育特征和形成时代,建立了青藏高原东部晚新生代构造挤出过程、构造应力场演化阶段与挤压—伸展交替演化历史,重点探讨了晚新生代重大构造事件发生的时限、构造作用方式和块体挤出作用,获得了以下主要认识。

(1) 青藏高原东部晚新生代最重要的构造事件发

生在中新世晚期至上新世早期,即前人命名的青藏运动或横断事件,该事件起始于 12~8 Ma,结束于约 3.6 Ma,其最显著的特征是青藏高原东部地块有序地向东挤出、高原东部地壳增厚、东缘年轻山系的快速隆升和地貌边界带的形成,构造挤出作用向东传播导致扬子地块盖层的褶皱变形等。这次构造事件基本奠定了青藏高原东部新构造和构造地貌格局。

(2) 发生在早、中更新世之交(1~0.6 Ma)的构造事件,即昆黄运动或元谋运动,构造挤出使青藏高原东部、尤其是高原东北隅地区进一步隆升,但本期事件因持续时间较短(<500 ka)而对高原隆升的贡献相对较小。最近 120 ka 以来的构造事件,即共和运动或最新构造变动,构造挤出伴随着强烈的地块旋转运动,川滇区围绕东喜马拉雅构造结发生顺时针旋转,中北段发生逆时针旋转。

(3) 在晚新生代青藏高原东部持续向东构造挤出过程中,出现了 2 期以发育断陷盆地特征的构

造松弛阶段:上新世中晚期至早更新世(3.6~1 Ma)和中更新世(0.6~0.12 Ma),它们代表了构造挤出造山后的重力垮塌和伸展变形,记录了构造挤出造山作用的阶段性演化历史。

#### 参考文献(References):

- [1] 钟大赅, 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. Uplift process of the Tibetan plateau and its mechanism [J]. Science in China(Series D), 1996, 26(4): 289–295(in Chinese).
- [2] England Ph, Houseman G. Finite strain calculations of continental deformation: 2. Comparison with the India–Asia Collision Zone[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1986, 91(B3):3664–3676.
- [3] Houseman G, England Ph. Crustal thickening versus lateral expulsion in the Indian–Asian continental collision[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1993, 98(B7):12233–12249.
- [4] Zhang Peizhen, Shen Zhengkang, Wang Min, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data[J]. Geology, 2004, 32(9):809–812.
- [5] 张培震, 甘卫军, 沈正康, 等. 中国大陆现今构造作用的地块运动和连续变形耦合模型[J]. 地质学报, 2005, 79(6): 748–756.  
Zhang Peizheng, Gan Weijun, Shen Zhengkang, et al. A Coupling Model of Rigid–block Movement and Continuous Deformation: Patterns of the Present–day Deformation of China’s Continent and Its Vicinity [J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(6): 748–756(in Chinese with English abstract).
- [6] Molnar P, Tapponnier P. Cenozoic Tectonics of Asia: Effects of a Continental Collision[J]. Science, 1975, 189:419–426.
- [7] Tapponnier P, Peltzer G, Armijo R. On the mechanics of the collision between India and Asia[J]. Geological Society, London, Special Publications, 1986, 19(1): 113–157.
- [8] Tapponnier P, Peltzer G, Le Dain, et al. Propagation extrusion tectonics in Asia: new insight from simple experiment with plastine[J]. Geology, 1982, 10: 611–616.
- [9] Tapponnier P, Xu Zhiqin, Roger F, et al. Oblique stepwise rise and growth of the Tibet Plateau[J]. Science, 2001, 294: 1671–1677.
- [10] Avouac J P, Tapponnier P. Kinematic model of active deformation in central Asia[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20(10): 895–898.
- [11] Royden Leigh H, Burchfiel B. Clark, King Robert W, et al. Surface Deformation and Lower Crustal Flow in Eastern Tibet[J]. Science, 1997, 276(5313):788–790.
- [12] Clark M K, Royden L H. Topographic ooze: Building the eastern margin of Tibet by lower crustal flow[J]. Geology, 2000, 28(8): 703–706.
- [13] Liu Mian, Cui Xiaojun, Liu Futian. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo–Asian collision?[J]. Tectonophysics, 2004, 393(1/4):29–42.
- [14] Zhang Yueqiao, Ma Yinsheng, Yang Nong, et al. Cenozoic extensional stress evolution in North China[J]. Journal of Geodynamics, 2003, 36(5):591–613.
- [15] Huang T K. On major tectonic forms of China[J]. Geol. Memoirs Ser A, 1945, 20:165.
- [16] Yin A, Harrison T M. Geologic Evolution of the Himalayan–Tibetan Orogen[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2000, 28(1):211–280.
- [17] 任纪舜, 王作勋, 陈炳蔚, 等. 从全球看中国大地构造——中国及邻区大地构造图简要说明[M]. 北京:地质出版社, 1999.  
Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei, et al. A Brief Description of the Tectonic Map of China and Adjacent Regions[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999(in Chinese).
- [18] 马丽芳主编. 中国地质图集[M]. 北京:地质出版社, 2002:348, Ma Lifang. Chinese Geological Atlas[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002:348 (in Chinese with English abstract).
- [19] 贾承造. 中国塔里木盆地构造特征与油气[M]. 北京:石油工业出版社, 1997.  
Jia Cheng zao. Tectonic Characteristics and Hydrocarbon in the Tarim Basin[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1997 (in Chinese with English abstract).
- [20] 贾承造, 何登发, 陆洁民. 中国喜马拉雅运动的期次及其动力学背景[J]. 石油与天然气地质, 2004, 25(2): 121–126.  
Jia Chengzao, He Dengfa, Lu Jiemin. Episodes and geodynamic setting of Himalayan movement in China[J]. Oil & Gas Geology, 2004, 25(2): 121–126 (in Chinese with English abstract).
- [21] 马宗晋, 张家声, 汪一鹏. 青藏高原三维变形运动学的时段划分和新构造分区[J]. 地质学报, 1998, 72(3): 211–227.  
Ma Zongjin, Zhang Jiasheng, Wang Yipeng. The 3–D deformation movement episodes and neotectonic domains in the Qinghai–Tibet Plateau[J]. Acta Geologica Sinica, 1998, 72(3): 211–227(in Chinese with English abstract).
- [22] 王天丰. 中国东部中生代板内变形、构造应力场及其应用[M]. 北京:地质出版社, 1993.  
Wang Tianfeng. The Meso– to Cenozoic Intraplate Formation, Tectonic Stress Field and its Application in East China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993 (in Chinese).
- [23] 葛肖虹, 任收麦, 马立祥, 等. 青藏高原多期次隆升的环境效应[J]. 地学前缘, 2006, 13(6):118–130.  
Ge Xiaohong, Ren Shoumai, Ma Lixiang, et al. Environmental effects of the multi– stage uplift of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(6):118–130 (in Chinese with English abstract).
- [24] 葛肖虹, 王敏沛, 刘俊来. 重新厘定“四川运动”与青藏高原初始隆升的时代、背景: 黄陵背斜构造形成的启示 [J]. 地学前缘, 2010, 17(4):206–217.

- Ge Xiaohong, Wang Minpei, Liu Junlai. Redefining the Sichuan Movement and the age and background of Qingzang Plateau's first uplift: The implication of Huangling anticline and its enlightenment[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(4):206–217 (in Chinese with English abstract).
- [25] 葛肖虹, 刘永江, 任收麦. 青藏高原隆升动力学与阿尔金断裂[J]. *中国地质*, 2002, 29(4):346–350.
- Ge Xiaohong, Liu Yongjiang, Ren Shoumai. Uplift dynamics of the Tibetan Plateau and Altyn Tagh fault[J]. *Geology in China*, 2002, 29(4):346–350 (in Chinese with English abstract).
- [26] 李吉均, 文世宣, 张青松. 青藏高原隆升的时代、幅度和形式的探讨[J]. *中国科学(D辑)*, 1979, (6):608–616.
- Li Jijun, Wen Shixuan, Zhang Qingsong. Discussion on the Tibetan Plateau uplift age, magnitude and form [J]. *Science China (Series D)*, 1979, (6):608–616(in Chinese with English abstract).
- [27] 李吉均, 方小敏, 马海洲, 等. 晚新生代黄河上游地貌演化与青藏高原隆升[J]. *中国科学(D辑)*, 1996, 26 (4): 316–322.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Ma Haizhou, et al. Geomorphic evolution of the upper reaches of the Yellow River and Uplift of the Qinghai – Xizang plateau in late Cenozoic[J]. *Science China (Series D)*, 1996, 26(4): 316– 322(in Chinese with English abstract).
- [28] 李吉均, 方小敏. 青藏高原隆起与环境变化研究[J]. *科学通报*, 1998, 43 (15) :1569–1574.
- Li Jijun, Fang Xiaomin. Tibetan Plateau uplift and Environmental Change[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43 (15) :1569–1574 (in Chinese).
- [29] 李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 381–391.
- Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, et al. Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai– Xizang plateau and its impacts on environments in surrounding area[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381–391(in Chinese with English abstract).
- [30] 崔之久, 伍永秋, 刘耕年, 等. 关于“昆仑–黄河运动”[J]. *中国科学(D辑)*, 1998, 28(1):53–59.
- Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian, et al. About "Kunlun – Yellow Movement"[J]. *Science in China(Series D)*, 1998, 28(1): 53–59 (in Chinese).
- [31] Cui Zhijiu, Wu Yongqiu, Liu Gengnian. Discovery and character of the Kunlun– Yellow River tectonic movement[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1998, 43(10): 833–836.
- [32] 陈富斌, 赵永涛. 攀西地区新构造[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 1998.
- Chen Fubin, Zhao Yongtao. New Structure of Panxi Area[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1998(in Chinese with English abstract).
- [33] 陈富斌. 横断事件: 亚洲东部晚新生代的一次重大构造事件[J]. *山地研究*, 1992, 10(4): 195–202.
- Chen Fubin. Hengduan event: an important tectonic event of the late Cenozoic in eastern Asia[J]. *Mountain Research* 1992, 10(4): 195–202 (in Chinese with English abstract).
- [34] 钱方, 周国兴. 元谋第四纪地质与人类[M]. 北京: 科学出版社, 1991.
- Qian Fang, Zhou Guoxing. Quaternary Geology and Palaeoanthropology of Yuanmou, Yunnan, China[M]. Beijing: Science Press, 1991 (in Chinese with English abstract).
- [35] 宋方敏, 汪一鹏, 俞维贤, 等. 小江活动断裂带[M]. 北京: 地震出版社, 1998.
- Song Fangmin, Wang Yipeng, Li Weixian, et al. Xiaojiang Active Fault Zone[M]. Beijing: Seismological Press, 1998 (in Chinese with English abstract).
- [36] 张培震. 中国大陆岩石圈最新构造变动与地震灾害[J]. *第四纪研究*, 1999, 19(5):404–413
- Zhang Peizhen. Late Quaternary Tectonic deformation and earthquake hazard in continental China[J]. *Quaternary Sciences*, 1999, 19(5):404–413 (in Chinese with English abstract).
- [37] 许志琴, 李廷栋, 杨经绥, 等. 大陆动力学的过去、现在和未来——理论与应用[J]. *岩石学报*, 2008, 24(7): 1433–1444.
- Xu Zhiqin, Li Tingdong, Yang Jingsui, et al. Advantages and perspectives of continental dynamics: Theory and application[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2008, 24(7): 1433–1444(in Chinese with English abstract).
- [38] 张国伟, 郭安林, 董云鹏, 等. 大陆地质与大陆构造和大陆动力学[J]. *地质前沿*, 2011, 18(3):1–12.
- Zhang Guowei, Guo Anlin, Dong Yunpeng, et al. Continental Geology, Tectonics and Dynamics [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(3):1–12(in Chinese with English abstract).
- [39] 王胜利, Chen Yan, 卢华复. 天山北麓霍尔果斯背斜晚中新世以来翼旋转方式的生长[J]. *科学通报*, 2008, 12: 1414–1421.
- Wang Shengli, Chen Yan, Lu Huafu. The growth of limb rotation of Huoerguosi anticline since the late Miocene in the North Tianshan Mountains [J]. *Science Bulletin*, 2008, 12: 1414– 1421 (in Chinese).
- [40] 卢华复, 贾承造. 库车再生前陆逆冲带的构造特征与成因[J]. *石油学报*, 2000, 21(3):18–24.
- Lu Huafu, Jia Chengzao. The structural features and origin of the Kuqa rejuvenation foreland thrust belt[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2000, 21(3):18–24(in Chinese with English abstract).
- [41] 刘志宏, 卢华复, 贾承造, 等. 库车再生前陆逆冲带造山运动时间、断层滑移速率的厘定及其意义[J]. *石油勘探与开发*, 2000, 27(1): 12–15.
- Liu Zhihong, Lu Huafu, Jia Chengzao, et al. Orogeny timing and fault–slip rate and their significance to the rejuvenated foreland thrusts belt of Kuche[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2000, 27(1):12–15(in Chinese with English abstract).
- [42] 李继亮, 肖文交, 闫臻. 盆山耦合与沉积作用[J]. *沉积学报*, 2003, 21(1):52–60.
- Li Jiliang, Xiao Wenjiao, Yan Zhen. Basin–range coupling and its

- sedimentation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica* 2003, 21(1):52–60 (in Chinese with English abstract).
- [43] 郑德文,张培震,万景林,等. 碎屑颗粒热年代学——一种揭示盆地耦合过程的年代学方法[J]. *地震地质*, 2000, (S1):25–36. Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, et al. Detrital grain thermochronology——a potential method for research on coupling process between basin and mountain[J]. *Seismology and Geology*, 2000, (S1):25–36(in Chinese with English abstract).
- [44] 马杏垣,中国岩石圈动力学地图集[M]. 北京:中国地图出版社, 1989. Ma Xingyuan. Atlas of Lithospheric Dynamics in China[M]. Beijing: China Geological Publishing House, 1989(in Chinese with English abstract).
- [45] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京: 科学出版社. 1973. Li Siguang. Introduction to Geomechanics [M]. Beijing: Science Press, 1973(in Chinese with English abstract).
- [46] 张国伟,孟庆任. 秦岭造山带的造山过程及其动力学特征[J]. *中国科学*, 1996 (3):193–200. Zhang Guowei, Meng Qingren. Orogeny and dynamic characteristics of the Qinling orogenic belt[J]. *Science in China*, 1996 (3):193–200(in Chinese with English abstract).
- [47] 邓起东,张培震,冉勇康,等. 中国活动构造基本特征[J]. *中国科学*, 2002,32(12): 1020–1030. Deng Qidong, Zhang Peizhen, Ran Yongkang, et al. Basic features of China's activity structure[J]. *Science in China*, 2002, 32(12): 1020–1030 (in Chinese).
- [48] 蒋复初,吴锡浩. 青藏高原东南部地貌边界带晚新生代构造运动[J]. *成都理工大学学报*, 1998,(2):162–168. Jiang Fuchu, Wu Xihao. Late Cenozoic tectonic movement in geomorphologic boundary belt of southeastern Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 1998, (2):162–168(in Chinese with English abstract).
- [49] 张岳桥, 杨农, 陈文,等. 中国东西部地貌边界带晚新生代构造变形历史与青藏高原东缘隆升过程初步研究[J]. *地质前缘*, 2003, 10(1): 599–612. Zhang Yueqiao, Yang Nong, Chen Wen, et al. Late Cenozoic tectonic deformation history of the east–west geomorphological boundary zone of China and uplift process of the eastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Geoscience Frontiers*, 2003, 10(1): 599–612(in Chinese with English abstract).
- [50] Zhang Yueqiao, Dong Shuwen and Yang Nong, Active faulting pattern, present–day tectonic stress field and block kinematics in the East Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009,83 (4): 694–712.
- [51] 高翔,邓起东. 巴颜喀喇断块边界断裂强震活动分析[J]. *地质学报*, 2013,87(1): 9–19. Gao Xiang, Deng Qidong. Activity analysis of large earthquakes in boundary faults around the Bayankala faulting block[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(1): 9–19 (in Chinese with English abstract).
- [52] 徐锡伟, 闻学泽, 郑荣章, 等. 川滇地区活动块体最新构造变动样式及其动力来源[J]. *中国科学(D辑)*, 2003,33(z1): 151–162. Xu Xiwei, Wen Xueze, Zheng Rongzhang, et al. The new tectonic movement pattern and its dynamic source of active block in Sichuan Yunnan region[J]. *Science China(Series D)*, 2003, 33(z1): 151–162
- [53] 闻学泽. 四川西部鲜水河—安宁河—则木河断裂带的地震破裂分段特征[J]. *地震地质*, 2000, 22(3): 239–249. Wen Xueze. Character of rupture segmentation of the Xianshuihe–Anninghe–Zemuhe fault zone, western Sichuan. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 239–249(in Chinese with English abstract).
- [54] 徐锡伟, 张培震, 闻学泽, 等. 川西及其邻近地区活动构造基本特征与强震复发模型[J]. *地震地质*, 2005, 27(3):446–461. Xu Xiwei, Zhang Peizhen, Wen Xueze, et al. Features of active tectonic and recurrence behaviors of strong earthquakes in the western Sichuan province and its adjacent regions[J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(3):446–461(in Chinese with English abstract).
- [55] 吴中海, 龙长兴, 范桃园, 等. 青藏高原东南缘弧形旋扭活动构造体系及其动力学特征与机制[J]. *地质通报*, 2015, 34(1): 1–31. Wu Zhonghai, Long Changxing, Fan Taoyuan, et al. The arc rotational–shear active tectonic system on the southeastern margin of Tibetan Plateau and its dynamic characteristics and mechanism[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(1): 1–31 (in Chinese with English abstract).
- [56] Fang Xiaomin, Garzione Carmala, Voo Rob Van Der, et al. Flexural subsidence by 29 Ma on the NE edge of Tibet from the magnetostratigraphy of Linxia Basin, China[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 210:545–560.
- [57] 岳乐平, 张莉. 兰州盆地第三系磁性地层年代与古环境记录[J]. *科学通报*, 2000,45(18): 1998–2003. Yue Leping, Zhang Li. The study of Magneto stratigraphy and Paleo environment evolution of Neogene sedimentary sequences in Lanzhou Area[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000,45(18): 1998–2003(in Chinese).
- [58] 张焱, 孙东怀, 韩飞, 等. 兰州地区新近纪地层的沉积相与古环境记录[J]. *沉积学报*, 2010, 28(3): 611–620. Zhang Yan, Sun Donghuai, Han Fei, et al. Depositional facies and paleoenvironmental record of the late tertiary stratum of Lanzhou area, Gansu[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(3): 611–620(in Chinese with English abstract).
- [59] Wang Zhicai, Zhang Peizhen, Garzione Carmala N, et al. Magnetostratigraphy and depositional history of the Miocene Wushan basin on the NE Tibetan plateau, China: Implications for middle Miocene tectonics of the West Qinling fault zone[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2012, 44(1):189–202.
- [60] Wang Xiuxi, Zattin Massimiliano, Li Jijun, et al. Eocene to Pliocene exhumation history of the Tianshui–Huicheng region

- determined by Apatite fission track thermochronology: Implications for evolution of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2011, 42(1–2):97–110.
- [61] Ge Junyi, Guo Zhengtang, Zhan Tao, et al. Magnetostratigraphy of the Xihe loess–soil sequence and implication for late Neogene deformation of the West Qinling Mountains[J]. *Geophysical Journal International*, 2012, 189(3):1399–1408.
- [62] 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 构造、气候与砾岩——以积石山和临夏盆地为例[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1):63–69.
- Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, et al. Tectonic events, climate and conglomerate: example from Jishian mountain and Linxia basin[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1):63–69(in Chinese with English abstract).
- [63] 郑德文, 张培震, 万景林, 等. 青藏高原东北边缘晚新生代构造变形的时序——临夏盆地碎屑颗粒磷灰石裂变径迹记录[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(SI):190–198.
- Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinglin, et al. Late Cenozoic deformation subsequence in northeastern margin of Tibet Detrital AFT records from Linxia Basin[J]. *Science in China(Series D)*, 2003, 33(SI):190–198(in Chinese with English abstract).
- [64] 袁道阳, 张培震, 方小敏, 等. 青藏高原东北缘临夏盆地晚新生代构造变形及过程[J]. *地学前缘*, 2007, 14(1): 243–250.
- Yuan Daoyang, Zhang Zhen, Fang Xiaomin, et al. Late Cenozoic tectonic deformation of the Linxia basin, northeastern margin of the Qinghai–Tibet Plateau[J]. *Geoscience Frontiers*, 2007, 14(1): 243–250(in Chinese with English abstract).
- [65] Wang Weitao, Zhang Peizhen, Kirby Eric, et al. A revised chronology for Tertiary sedimentation in the Sikouzi basin: Implications for the tectonic evolution of the northeastern corner of the Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 2011, 505(1/4):100–114.
- [66] Wang Weitao, Kirby Eric, Peizhen Zhang, et al. Tertiary basin evolution along the northeastern margin of the Tibetan Plateau: Evidence for basin formation during Oligocene transtension[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2013, 125(3/4):377–400.
- [67] 王苏民, 薛滨. 中更新世以来若尔盖盆地环境演化与黄土高原比较研究[J]. *中国科学*, 1996, (4): 323–328.
- Wang Sumin, Xue Bin. The environmental evolution comparison between the Zioge Basion and Losess Plateau since the Middle Pleistocene, *Science in China*, 1996, (4): 323–328(in Chinese).
- [68] 吴敬禄, 王苏民, 潘红玺, 等. 青藏高原东部RM孔140 ka以来湖泊碳酸盐同位素记录的古气候特征[J]. *中国科学(D辑:地球科学)*, 1997, (3): 255–259.
- Wu Jinglu, Wang Sumin, and Pan Hongxi, et al. Climatic variations in the past 140 ka recorded in core RM, East Qinghai–Xizang Plateau[J]. *Science in China(Series D)*, 1997, (3): 255–259 (in Chinese).
- [69] Kirby E, Whipple K X, Burchfiel B C, et al. Neotectonics of the Min Shan, China: Implications for mechanisms driving Quaternary deformation along the eastern margin of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112 (3): 375–393.
- [70] 杨农, 张岳桥, 孟辉, 等. 川西高原岷江上游河流阶地初步研究[J]. *地质力学学报*, 2003, 9(4):363–370.
- Yang Nong, Zhang Yueqiao, Meng Hui, et al. Study of the Minjiang river terraces in the western Sichuan Plateau[J]. *Journal of Geomechanics*, 2003, 9(4):363–370(in Chinese with English abstract).
- [71] 张岳桥, 李海龙, 吴满路, 等. 岷江断裂带晚新生代逆冲推覆构造: 来自钻孔的证据[J]. *地质论评*, 2012, (2): 215–223.
- Zhang Yueqiao, Li Hailong, Wu Manlu, et al. Late Cenozoic Thrust and Nappe Structure along the Minjiang Upstream: Evidence from a Drill Hole[J]. *Geological Review*, 2012, (2): 215–223(in Chinese with English abstract).
- [72] 李勇, 周荣军, Densmore A L, 等. 龙门山断裂带走滑方向的反转及其沉积与地貌标志[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(4): 26–34.
- Li Yong, Zhou Rongjun, Densmore A L, et al. Geomorphic and sedimentary evidence for reversion of strike–slip direction in longmen shan fault zone[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(4): 26–34(in Chinese with English abstract).
- [73] Kong Ping, Zheng Yong, and Fu Bihong, Cosmogenic nuclide buried ages and provenance of late Cenozoic deposits in the Sichuan basin: Implication for early Quaternary glaciations in east Tibet[J]. *Quaternary Geochronology*, 2011, 6(3): 304–312.
- [74] 宗冠福. 四川盐源盆地哺乳类化石及其意义[J]. *古脊椎动物学报*, 1987, 2:137–145,167–168.
- Zong Guanfu. Note on some mammalian fossils of Yanyuan, Sichuan[J]. *Vertebrata Palasiatica*, 1987, 2:137–145,167–168(in Chinese with English abstract).
- [75] 卢海建, 王二七, 李仕虎, 等. 青藏高原东南缘构造旋转变形分析: 以四川盐源盆地古地磁研究为例[J]. *中国地质*, 2015, 42(5): 1188–1201.
- Lu Haijian, Wang Erqi, Li Shihu, et al. Rotational deformation of the southeastern margin of Tibet: A paleomagnetic study of the Yanyuan basin, Sichuan Province *Geology in China*, 2015, 42(5): 1188–1201(in Chinese with English abstract).
- [76] Wang E C, Burchfiel B C, Royden L H, et al. Late Cenozoic Xianshuihe–Xiaojiang Red River, and Dali fault systems of south–western Sichuan and central Yunnan, China[J]. *Geological Society of America Special Paper*, 1998, 327: 108.
- [77] 肖海丰, 沈吉, 肖霞云. 云南省鹤庆盆地 78 Ma 以来的环境演化[J]. *湖泊科学*, 2006, 18 ( 3 ) : 255–260.
- Xiao Haifeng, Shen Ji, Xiao Xiaoyun. Paleoenvironmental evolution of Heqing basin in Yunan province since 2.78Ma[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2006, 18 (3) : 255–260(in Chinese with English abstract).
- [78] Li S, Deng C, Yao H, et al. Magnetostratigraphy of the Dali Basin

- in Yunnan and implications for late Neogene rotation of the southeast margin of the Tibetan Plateau [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118(3):791–807.
- [79] 周国兴, 张兴永. 元谋人[M]. 昆明: 云南人民出版社, 1984: 1–195.  
Zhou Guoxing, Zhang Xingyong. Yuanmou Man[M]. Kunming: Yunnan People's Publishing House, 1984:1–195(in Chinese with English abstract).
- [80] 李普, 钱方, 马醒华, 等. 用古地磁方法对元谋人化石年代的初步研究[J]. *中国科学*, 1976, (6): 579–591.  
Li Pu, Qian Fang, Ma Xinghua, et al. A preliminary study on the fossil age of the Yuanmou Man with the method of the Paleomagnetism[J]. *Science in China*, 1976, (6): 579–591(in Chinese).
- [81] 浦庆余, 钱方. 对元谋人化石层——元谋组的研究[J]. *地质学报*, 1977, 1: 89–99.  
Pu Qingyu, Qian Fang. A study on the Yuanmou formation[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1997, 1: 89–99(in Chinese).
- [82] 宗冠福, 潘悦容. 元谋盆地含古猿化石层时代的初步划分[J]. *人类学学报*, 1991, 10(2): 155–166.  
Zong Guanfu, Pan Yuerong. Preliminary division of the Stratigraphic age of the Hominoid fossilied Yuanmou Basin. *Acta Anthropologica Sinica*, 1991, 10(2): 155–166(in Chinese with English abstract).
- [83] 程国良, 李素玲, 林金录. “元谋人”的地质年代和松山早期事件的商榷[J]. *地质科学*, 1977, (1): 34–43.  
Chen Guoliang, Li Suling, Lin Jinlu. Discussion on the geological age of the Yuanmou Man and the early Songshan event[J]. *Chinese Journal of Geology*, 1977, (1):34–43(in Chinese with English abstract).
- [84] 张宗祜, 刘平贵, 钱方, 等. 元谋盆地晚新生代地质研究的新进展[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1994, 14(2): 1–17.  
Zhang Zonghu, Liu Pinggui, Qian Fang, et al. New development in research of Late Cenozoic stratigraphy in Yuanmou Basin[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 1994, 14(2):1–17(in Chinese).
- [85] 梁其中, 江能人, 孙荣. 元谋盆地晚新生代地层的磁性地层学研究[J]. *云南地质*, 1988, 7(3): 245–256.  
Liang Qizhong, Jiang Nengren, Sun Rong. The magnetic stratigraphy study on late Cenozoic strata in Yuanmou basin[J]. *Yunnan Geology*, 1988, 7(3): 245–256(in Chinese with English abstract).
- [86] Hyodo M, Nakaya H, Urabe A, et al. Paleomagnetic dates of hominid remains from Yuanmou, China, and other Asian sites[J]. *Jour. Hum. Evol.*, 2002, 43:27–41.
- [87] 岳乐平, 张云翔, 祁国琴, 等. 云南元谋盆地含古猿化石层古地磁年龄及古生物学意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2003, 33(11): 1069–1075.  
Yue Leping, Zhang Yunxiang, Qi Guoqin, et al. Paleomagnetic study and its Paleontology significance of the Yuanmou basin' Ape-man layer[J]. *Science in China(Series D)*, 2003, 33(11): 1069–1075 (in Chinese).
- [88] 黄万波, 王景文, 邱铸鼎, 等. 元谋组、龙街组及昔格达组的时代对比[C]//中国地质科学院地层古生物论文集编委会主编. 地层古生物论文集(第七辑). 北京:地质出版社, 1978: 30–39.  
Huang Wanbo, Wang Jingwen, Qiu Zhuoding. The comparison of the time between the Yuanmou formation, the Longjie formation and the Xigeda formation [C]//Chinese Academy of Geological Sciences(edits). A collection of the Stratigraphic Paleontology (Vol.7). Beijing: Geological Publishing House, 1978:30–39 (in Chinese).
- [89] 姚海涛, 赵志中, 乔彦松, 等. 四川冕宁昔格达组磁性地层学初步研究及意义[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1):74–84.  
Yao Haitao, Zhao Zhizhong, Qiao Yansong, et al. Magneto stratigraphic dating of the Xigeda formation in Mianning, Sichuan and its significance[J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(1):74–84 (in Chinese with English abstract).
- [90] Zhang Yueqiao, Li Hailong, Li Jian. Neotectonics of the eastern margin of Tibetan Plateau: new geological evidence for the change from early Pleistocene transpression to late Pleistocene–Holocene strike–slip faulting[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(2): 467–485.
- [91] Leloup P H, Kienast J R. High temperature metamorphism in a major Tertiary ductile continental strike–slip shear zone: The Ailao Shan–Red River (P.R.C.) [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1993, 118: 213–234, doi: 10.1016/0012–821X(93)90169–A.
- [92] Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, et al. The Ailao Shan–Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 1995, 251: 3–84.
- [93] Leloup P H, Arnaud N, Lacassin R, et al. New constraints on the structure, thermochronology, and timing of the Ailao Shan–Red River shear zone, SE Asia[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(B4): 6683–6732.
- [94] Gilley L D, Harrison T M, Leloup P H, et al. Direct dating of left lateral deformation along the Red River shear zone, China and Vietnam[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 10(B2): 2127, doi: 10.1029/2001JB001726.
- [95] Wang E C, Burchfiel B C. Interpretation of Cenozoic tectonics in the right–lateral accommodating zone between the Ailao Shan shear zone and the eastern Himalayan synaxis[J]. *International Geology Review*, 1997, 39: 191–219.
- [96] Allen C R, Gillespie A R, Han Y, et al. Red River and associated faults, Yunnan province, China: Quaternary geology, slip rate and Seismic hazard[J]. *GSA Bulletin*, 1984, 95: 686–700.
- [97] Replumaz A, Lacassin R, Tapponnier P, et al. Large river offsets and Plio–Quaternary dextral strike–slip rate on the Red River fault (Yunnan, China) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001,

- 106(B1): 819–836.
- [98] Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen L, et al. Miocene to present activity along the Red River fault, China, in the context of continental extrusion, upper– crustal rotation, and lower– crustal flow[J]. *GSA Bulletin*, 2006, 118(5/6): 672–688.
- [99] 向宏发, 魏顺民, 张晚霞, 等. 红河断裂带南段中新世以来大型右旋位错量的定量研究[J]. *地震地质*, 2007, 29(1): 34–50.  
Xiang Hongfa, Guo Shunmin, Zhang Wanxia, et al. Quantitative study on the large scale dextral strike– slip offset in the southern segment of the red river fault since miocene[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1): 34–50(in Chinese with English abstract).
- [100] Rangin C, Klein M, Roques D, et al. The Red River fault system in the Tonkin Gulf, Vietnam[J]. *Tectonophysics*, 1995, 243: 209–222.
- [101] Wang E, Burchfiel B C. Late Cenozoic to Holocene deformation in southwestern Sichuan and adjacent Yunnan, China, and its role in formation of the southeastern part of the Tibetan Plateau[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2000, 112(3): 412–423.
- [102] 申旭辉, 陈正位, 许任德, 等. 凉山活动构造带晚新生代变形特征与位移规模[J]. *地震地质*, 2000, 22(3): 232–238.  
Shen Xuhui, Chen Zhengwei, Xu Rende, et al. Deformation characteristics and displacement amount of the liangshan active fault zone in late Cenozoic era[J]. *Seismology and Geology*, 2000, 22(3): 232–238(in Chinese with English abstract).
- [103] 张岳桥, 陈文, 杨农. 川西鲜水河断裂带晚新生代剪切变形<sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar测年及其构造意义[J]. *中国科学(D辑)*, 2004, 34(7): 613–621.  
Zhang Yueqiao, Chen Wen, Yang Nong. <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar dating of shear deformation of the Xianshuihe fault zone in west Sichuan and its tectonic significance[J]. *Science China(Series D)*, 2004, 34(7): 613–621(in Chinese).
- [104] 陈文, 张彦, 张岳桥, 等. 青藏高原东南缘晚新生代幕式抬升作用的Ar–Ar热年代学证据[J]. *岩石学报*, 2006, 22(4): 867–872.  
Chen Wen, Zhang Yan, Zhang Yueqiao, et al. Late Cenozoic episodic uplifting in southeastern part of the Tibetan plateau–evidence from Ar–Ar thermochronology[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(4): 867–872(in Chinese with English abstract).
- [105] Guo Jianming, Lin Aiming, Sun Guoqiang, et al. Surface Ruptures Associated with the 1937 M 7.5 Tuosuo Lake and the 1963 M 7.0 Alake Lake Earthquakes and the Paleoseismicity along the Tuosuo Lake Segment of the Kunlun Fault, Northern Tibet[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2007, 97(2): 474–496.
- [106] Lin A M, Fu B H, Guo J M, et al. Co–seismic strike–slip and rupture length produced by the 2001 Ms8.1 Central Kunlun earthquake[J]. *Science*, 2002, 296(5575):2015–2017.
- [107] Liu G, Xiao Z, Xie X, T, et al. The surface rupture zone of the 1937 Huashixia earthquake (M= 7.5) in Qinghai[J]. *Research on Active Faults*, 1996, 5:136–153.
- [108] Van der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Holocene left– slip rate determined by cosmogenic surface dating on the Xidatan segment of the Kunlun fault (Qinghai, China) [J]. *Geology*, 1998, 26(8): 695–698.
- [109] Van der Woerd J, Ryerson F J, Tapponnier P, et al. Uniform slip–rate along the Kunlun Fault: Implications for seismic behaviour and large scale tectonics[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(16): 2353–2356.
- [110] Van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. Uniform postglacial slip–rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from <sup>26</sup>Al, <sup>10</sup>Be, and <sup>14</sup>C dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 356–388.
- [111] Li Haibing, Van der Woerd, J., Tapponnier, P., et al. Slip rate on the Kunlun fault at Hongshui Gou, and recurrence time of great events comparable to the 14/11/2001, Mw~ 7.9 Kokoxili earthquake[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 237(1): 285–299.
- [112] Harkins N, Kirby E. Fluvial terrace riser degradation and determination of slip rates on strike– slip faults: An example from the Kunlun fault, China[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35 (L05406):1–6.
- [113] Harkins N, Kirby E, Shi X, et al. Millennial slip rates along the eastern Kunlun fault: Implications for the dynamics of intracontinental deformation in Asia[J]. *Lithosphere*, 2010, 2(4): 247–266.
- [114] Li Jian, Zhang Yueqiao, Li Hailong, et al. Revisiting Late Quaternary Slip–rate along the Maqu Segment of the Eastern Kunlun Fault, NE Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90(2): 801–840.
- [115] Fu Bihong, Awata Y. Displacement and timing of left– lateral faulting in the Kunlun Fault Zone, northern Tibet, inferred from geologic and geomorphic features[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2007, 29: 253–265.
- [116] Li Yiquan, Jia Dong, Shaw J H, et al. Structural interpretation of the co–seismic faults of the Wenchuan earthquake: 3D modeling of the Longmen Shan fold– and– thrust belt[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115(B04317): 1–26.
- [117] Jia Dong, Li Yiquan, Lin Aiming, et al. Structural model of 2008 Mw 7.9 Wenchuan earthquake in the rejuvenated Longmen Shan thrust belt, China[J]. *Tectonophysics*, 2009, 491: 174–184.
- [118] Jia Dong, Wei Guoqi, Chen Zhuxin, et al. Longmen Shan fold–thrust belt and its relation to the western Sichuan Basin in central China: New insights from hydrocarbon exploration[J]. *The American Association of Petroleum Geologists*, 2006, 90(9): 1425–1447.
- [119] Arne D, Worley B, Wilson C, et al. Differential exhumation in response to episodic thrusting along the eastern margin of the

- Tibetan Plateau[J]. *Tectonophysics*, 1997, 280: 239–256.
- [120] Kirby E, Reiners P W, Krol M A, et al. Late Cenozoic evolution of the eastern margin of the Tibetan Plateau: Inferences from Ar-40/Ar-39 and (U-Th)/He thermochronology[J]. *Tectonics*, 2002, 21(1):1–20.
- [121] Wang E, Kirby E, Furlong K P, et al. Two-phase growth of high topography in eastern Tibet during the Cenozoic[J]. *Nature Geosci.*, 2012, 5(9):640–645.
- [122] 张培震, 郑德文, 尹功明, 等. 有关青藏高原东北缘晚新生代扩展与隆升的讨论[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(1): 5–13.  
Zhang Peizhen, Deng Dewen, Yin Gongming, et al. Discussion on late Cenozoic growth and rise of northeastern margin of the Tibetan plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(1): 5–13(in Chinese with English abstract).
- [123] Liu Jianhui, Zhang Peizhen, Richard O. Lease, et al. Eocene onset and late Miocene acceleration of Cenozoic intracontinental extension in the North Qinling range–Weihe graben: Insights from apatite fission track thermochronology[J]. *Tectonophysics*, 2013, 584(22):281–296.
- [124] Lease Richard O., Burbank Douglas W., Clark Marin K., et al. Middle Miocene reorganization of deformation along the northeastern Tibetan Plateau [J]. *Geology*, 2011, 39(4):359–362.
- [125] Zheng Dewen, Zhang Peizhen, Wan Jinlin, et al. Rapid exhumation at ~8 Ma on the Liupan Shan thrust fault from apatite fission-track thermochronology: Implications for growth of the northeastern Tibetan Plateau margin[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 248(1–2):198–208.
- [126] Xu G, Kamp P J. Tectonics and denudation adjacent to the Xiushuihe fault, eastern Tibetan Plateau: constraint from fission-track thermochronology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(B8):19231–19251.
- [127] Clark Marin K, Farley Kenneth A, Zheng Dewen, et al. Early Cenozoic faulting of the northern Tibetan Plateau margin from apatite (U-Th)/He ages[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 296(1–2):78–88.
- [128] 张岳桥, 李海龙, 李建华. 青藏高原东缘中更新世伸展作用及其新构造意义[J]. *地质论评*, 2010, 56(6): 781–791.  
Zhang Yueqiao, Li Hailong, Li Jianhua. Middle Pleistocene Extension along the Eastern Margin of Xizang (Tibetan) Plateau and Its Neotectonic Significance[J]. *Geological Review*, 2010, 56(6): 781–791(in Chinese with English abstract).
- [129] Guo Xiaoyu, Gao Rui, Randy Keller G., et al. Imaging the crustal structure beneath the eastern Tibetan Plateau and implications for the uplift of the Longmen Shan range[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 379(0):72–80.
- [130] 张岳桥, 杨农, 孟晖, 等. 四川攀西地区晚新生代构造变形历史与隆升过程初步研究[J]. *中国地质*, 2004, 31(1):23–33.  
Zhang Yueqiao, Yang Nong, Meng Hui, et al. Late Cenozoic tectonic deformation history and uplift process of the Panxi region, western Sichuan[J]. *Geology in China*, 2004, 31(1):23–33(in Chinese with English abstract).
- [131] Shen Zhengkang, Lü Jiangning, Wang Min, et al. Contemporary crustal deformation around the southeast borderland of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110(B11409): 1–17.
- [132] Bai Denghai, Unsworth M J, Meju M A, et al. Crustal deformation of the eastern Tibetan plateau revealed by magnetotelluric imaging[J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5): 358–362.
- [133] Dai Shuang, Fang Xiaomin, Dupont–Nivet Guillaume, et al. Magnetostratigraphy of Cenozoic sediments from the Xining Basin: Tectonic implications for the northeastern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(B11): B11102.
- [134] Lease Richard O, Burbank Douglas W, Hough Brian, et al. Pulsed Miocene range growth in northeastern Tibet: Insights from Xunhua Basin magnetostratigraphy and provenance[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2012, 124(5/6): 657–677.