

龙门山前陆褶皱冲断带的平衡剖面分析

陈竹新¹⁾, 贾东¹⁾, 张愷¹⁾, 魏国齐²⁾, 李本亮²⁾, 魏东涛¹⁾, 沈扬¹⁾

1) 南京大学地球科学系, 210093; 2) 中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院, 北京, 100083

内容提要: 对龙门山前陆褶皱冲断带形成的正反转构造过程有过许多分析, 但明显缺乏直接的证据和定量的分析。本文在地层资料分析的基础上, 借助平衡剖面分析验证龙门山形成的正反转构造过程: 志留纪至中三叠世受多条倾向北西的同沉积断裂控制; 晚三叠世以来遭受北西—南东向挤压、抬升和剥蚀, 形成逆冲推覆构造。在晚三叠世和新生代的两期板块碰撞的影响下, 龙门山产生了两期褶皱冲断作用, 但在南、北两段表现出显著不同的变形过程。龙门山北段表现为复杂的逆冲推覆构造, 能明确划分出两期构造变形, 晚三叠世的变形强烈, 缩短率达 31.7%; 而新生代的变形较弱, 缩短率仅为 10.5%。南段则表现出基底卷入的叠瓦状冲断的特点, 主要体现新生代的构造变形, 晚三叠世的构造变形基本上被改造, 南段整体缩短率达 26.2%。

关键词: 龙门山; 平衡剖面; 正反转构造; 缩短率

对龙门山前陆褶皱冲断带(文中简称龙门山)的研究已有相当长的历史, 在构造变形特征、发育演化和形成的动力学机制等方面已经取得了很多较为明确的认识(潘桂棠等, 1983; 金若谷, 1987; 卢华复等, 1989; 罗志立, 1991; 林茂炳等, 1991; 刘和甫等, 1994; 杨逢清等, 1994; 刘树根等, 1995; 曾允孚等, 1995), 而且对其形成的正反转过程也进行过许多分析(龙学明, 1991; Chen et al., 1996), 但直接的证据和定量的分析依然比较缺乏。目前, 针对前陆冲断褶皱带的定量研究已经有了比较成熟的方法, 其中平衡剖面技术更是应用广泛(Suppe, 1983; 卢华复等, 1994, 2003; Thomas Flöttmann et al., 1997; Jia Dong et al., 1998; 陈楚铭等, 1999)。Thomas Flöttmann 等(1997)借助平衡剖面技术恢复了澳大利亚南部的阿德莱德(Adelaide)前陆褶皱冲断带的早期伸展构造, 并分析了其构造演化过程, 得出结论认为早期伸展构造在很大程度上影响和控制了后期褶皱冲断构造的发育, 该研究还认为即使在对变形强烈的褶皱冲断带的缩短变形过程进行分析时, 平衡剖面技术也是一种非常有效的方法。龙门山与阿德莱德冲断带有着类似的构造变形和演化过程, 其变形前的初始构造以及构造变形过程的确定直接关系到正确认识和解析龙门山构造变形特征。本文在

地层资料分析的基础上, 借助二维剖面的平衡恢复分析和验证了龙门山形成的正反转构造, 即早期的伸展构造特征以及晚期遭受挤压后的推覆逆冲变形过程。

1 龙门山前陆褶皱冲断带

龙门山介于华北陆块、扬子陆块和羌塘陆块之间, 是松潘—甘孜褶皱带的东缘(图 1), 同时也是青藏高原的东界(潘桂棠等, 1983; 黄汲清等, 1987)。罗志立(1991)认为龙门山是扬子地台的西界, 是太平洋板块活动的效应, 应与西侧的松潘—甘孜褶皱带分开, 具有特色的 C 型俯冲模式。许志琴等(1992)则认为龙门山应作为松潘—甘孜褶皱带的一部分, 是褶皱带向扬子陆块逆冲推覆的前缘过渡带。刘和甫等(1994)认为二叠纪以前扬子陆块可以向龙门山以西延伸至金沙江一带, 其上发育沉积盖层, 后期受板块聚合作用影响而形成松潘—甘孜褶皱带, 在先锋逐步发育龙门山。本文也认为龙门山是松潘—甘孜褶皱带的东缘前锋, 它的形成与西侧褶皱带的挤压缩短密切相关。

龙门山发育青川—茂汶—汶川—陇东断裂(F_1)、北川—映秀—五龙断裂(F_2), 龙门山中央断裂和安县—灌县—双石断裂(F_3)三条主干断裂, 各构

注: 本文为国家自然科学基金项目(编号 40372091)、中国石油天然气集团公司创新基金项目和国家“十五”重点科技攻关项目(编号 2001BA605A-06-01)资助的成果。

收稿日期: 2003-10-24; 改回日期: 2004-05-16; 责任编辑: 章雨旭。

作者简介: 陈竹新, 男, 1979 年生。2001 年获石油大学(华东)学士学位, 现为南京大学地球科学系 2003 级博士研究生。通讯地址: 210093, 南京市汉口路 22 号; Email: czxin@sina.com。

造岩片成叠瓦状向盆地方向逆冲推覆(图 1)。西侧为松潘—甘孜三叠系复理石沉积盆地, 盆地内褶皱变质强烈; 东侧为川西前陆盆地, 构造则相对简单。龙门山结构复杂, 构造变形强烈, 整体上由一系列运动方向为北西向南东逆冲推覆于扬子克拉通之上的岩片和推覆体组成(林茂炳等, 1991; 胡新伟等, 1996; 吴山等, 1999; 陶晓风, 1999; 于苏俊, 2000)。

根据构造变形和地层发育等特征, 龙门山可以分为南、北两段, 分界线位于安县附近。南段大面积出露前震旦纪基底杂岩, 表现出基底卷入的叠瓦状冲断的特点, 可以划分为彭灌推覆体、五龙推覆体、宝兴推覆体、冲断前锋带以及位于其上的规模不一的飞来峰群等构造单元; 而北段则主要是古生界和中生界地层组成的推覆岩片, 表现出复杂的逆冲推覆构

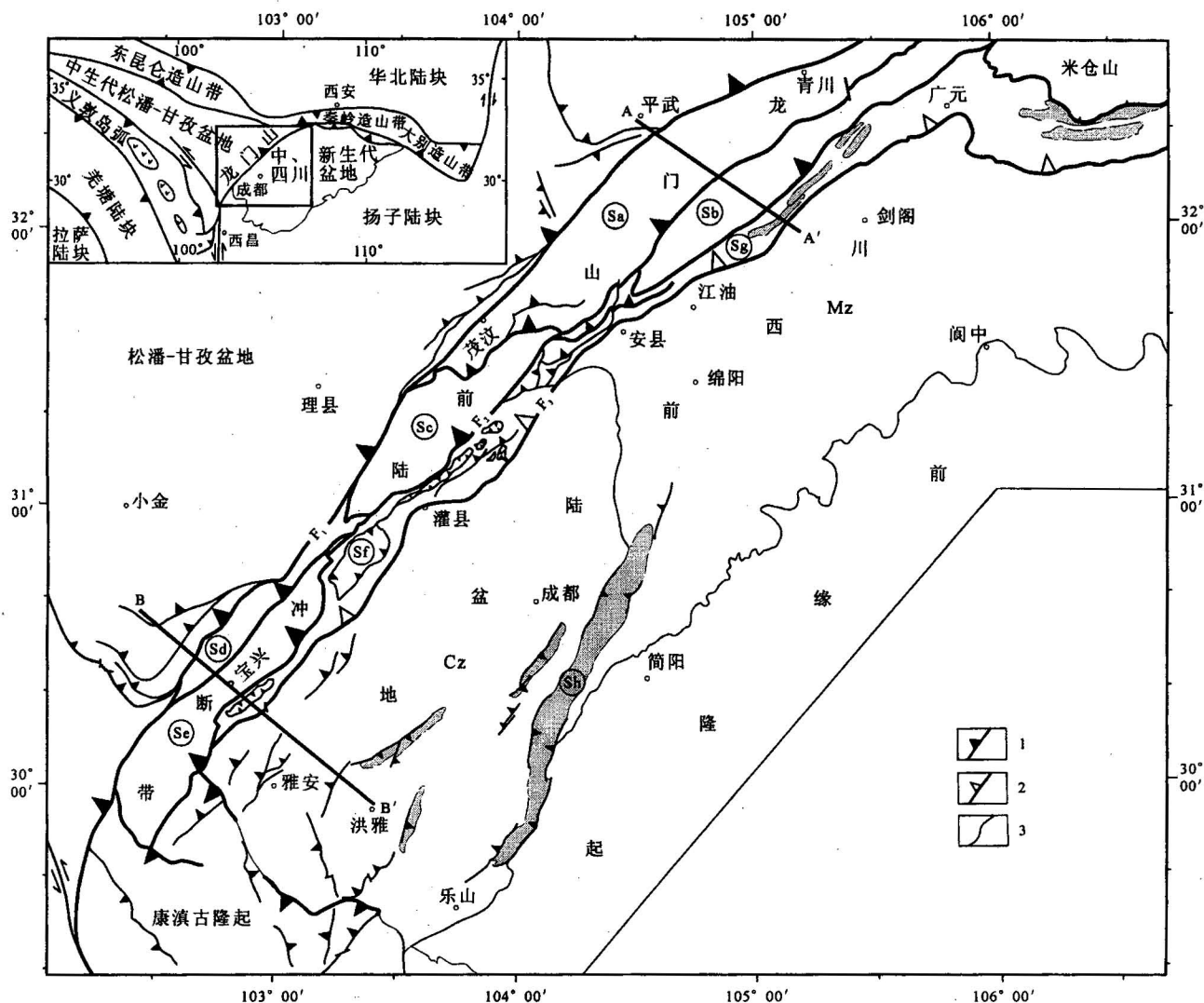


图 1 龙门山褶皱冲断带及川西前陆盆地构造简图

(据四川省 1:50 万地质图^①编绘; 左上角图据王二七等, 2001 修改)

Fig. 1 Generalized tectonic map of the fold-thrust belt of the Longmen Mountains and the western Sichuan foreland basin [after the Geological Map (1:500000) of Sichuan Province^①; the cornal map after Wang Erqi et al., 2001]

1—逆冲断层; 2—隐伏逆冲断层; 3—构造单元界线; Mz—中生代前缘拗陷; Cz—新生代前缘拗陷; F₁—汶川—茂汶断裂; F₂—北川—映秀断裂; F₃—安县—灌县断裂; Sa—轿子顶推覆体; Sb—唐王寨推覆体; Sc—彭灌推覆体; Sd—五龙推覆体; Se—宝兴推覆体; Sf—飞来峰; Sg—冲断前锋; Sh—局部背斜

1—Thrust fault; 2—blind thrust fault; 3—structural unit boundary; Mz—the Mesozoic foredeep; Cz—the Cenozoic foredeep; F₁—Wenchuan—Maowen thrust fault; F₂—Beichuan—Yingxiu thrust fault; F₃—Anxian—Guanxian thrust fault; Sa—Jiaoziding nappe; Sb—Tangwangzhai nappe; Sc—Pengguan nappe; Sd—Wulong nappe; Se—Baoping nappe; Sf—klippen; Sg—the front of thrusting; Sh—anticline

造特征,可以划分为轿子顶推覆体、唐王寨推覆体以及冲断前锋带等几个大的推覆构造单元。板块构造背景以及构造变形分析确定了龙门山前陆褶皱冲断带主要经历了晚三叠世和新生代两次大的构造变形,但这两期变形对龙门山南段和北段的作用强度有所不同(贾东等,2003)。

2 地层发育特征

川西及龙门山地区发育了较齐全的震旦纪以来的沉积地层(郭正吾等,1996)。在此,仅讨论与龙门山形成相关的地层的发育和分布特征。

震旦系至中三叠统主要为被动大陆边缘沉积,发育海相碳酸盐台地。晚震旦纪灯影期川西主要为广海陆棚的碳酸岩沉积,寒武纪—奥陶纪发育浅海碳酸盐和碎屑岩沉积,这在龙门山及其两侧都有相应的分布。志留纪—石炭纪时期沿龙门山一带沉积了很厚的深水碎屑岩和碳酸岩,西厚东薄,发育各类灰岩、白云岩,反映了当时扬子陆块西缘发生过快速沉降。这一点也解释了龙门山北段唐王寨推覆体中发育两套完全不同的古生界的成因,其中一套为薄的并且发育不完整的与川西盆地内部的古生界地层相似,它代表了扬子克拉通西部边缘的沉积特征,为

原地沉积;另一套是具有浅变质特点的发育完整的厚层古生界,与松潘—甘孜盆地西部出露的地层相似,为外来的逆冲岩片(四川省地质矿产局,1991;张勤文,1981)。早、中三叠世时期是龙门山发生构造反转的过渡时期(图2,图3),其沉积以海相碳酸盐岩为主,在整个龙门山中都有很好的分布,但在龙门山两侧厚度差异较大,西北侧雷口坡组的厚度可达数千米,南东侧仅为数百米。

上三叠统基本上以陆相沉积为主,发育碎屑岩沉积和部分砾岩以及细粒的煤系地层,沉积厚度巨大,主要分布于龙门山及其东侧的前渊拗陷中(图3),反映了龙门山逆冲推覆的形成。侏罗纪以来,川西前缘拗陷沉积了巨厚的陆缘碎屑岩,其中大部分是砾岩沉积(崔秉荃等,1991)。侏罗系至下白垩统分布在整个川西前陆盆地中,而且在龙门山北段广泛存在侏罗系与下伏地层的角度不整合;晚白垩世以来的沉积则主要分布在川西前陆盆地的南段。

由于龙门山变形强烈,其中尚未发现能证明早期正断裂存在的直接证据,但在宝兴可以见到韧性正断层(Burchfiel et al., 1995)。龙学明(1991)和刘文均等(1999)认为自志留纪开始,在扬子西缘的稳定大陆边缘上发育了北川—映秀、汶川—茂汶等同

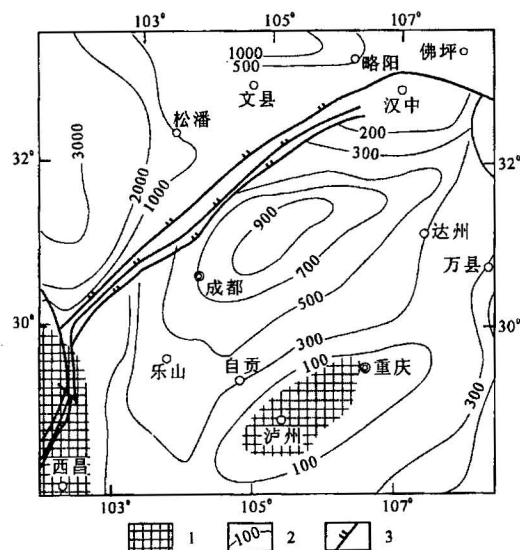


图2 龙门山及邻区中三叠统雷口坡组等厚线图
(单位:m)(据郭正吾,1996 修改)

Fig. 2 Isopach map (in meters) of Middle Triassic strata (Leikoupo Formation) in the Longmen Mountains and adjacent regions (modified from Guo Zhengwu, 1996)

1—古隆起;2—等厚线;3—正断层

1—Palaeohigh; 2—thickness contour; 3—normal fault

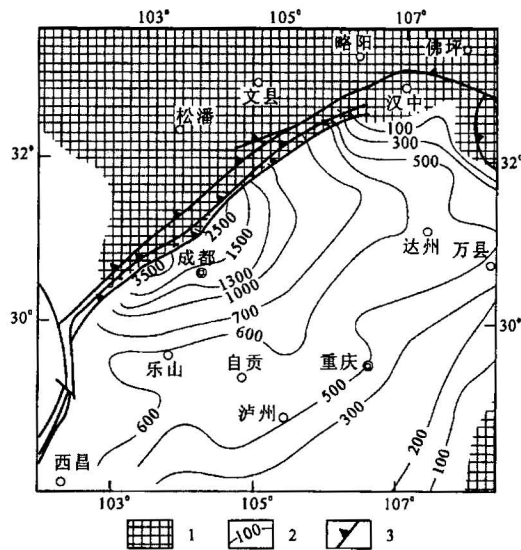


图3 川西前陆盆地上三叠统须家河组等厚线图
(单位:m)(据郭正吾,1996 修改)

Fig. 3 Isopach map (in meters) of Upper Triassic strata (Xujiache Formation) in the western Sichuan foreland basin (modified from Guo Zhengwu, 1996)

1—古隆起;2—等厚线;3—逆断层

1—Palaeohigh; 2—thickness contour; 3—thrust fault

沉积断裂,控制了志留系、泥盆系和二叠系的沉积,并对此做了详细的论述。罗志立(1991)和刘和甫等(1994)多次强调在震旦纪早期、志留纪以及二叠纪晚期,扬子陆块西部经历了多次大陆伸展裂解过程,这些伸展构造为正断裂的发育提供了很好的条件和佐证。

通过以上分析,我们有理由推断沿龙门山西缘存在早期同沉积正断裂,并控制了南北两段中志留纪至中三叠世的沉积,这些断裂同时也是后来龙门山的主干推覆断裂的基础,这说明龙门山的形成是一个正反转构造过程。

3 平衡剖面分析

学者们对于龙门山由北西向南东的挤压缩短方

向有着共识(罗志立,1991;林茂炳,1991;许志琴等,1992;刘和甫,1994;贾东等,2003)。然而贾东等(2003)研究表明,龙门山北段和南段有着明显不同的构造变形特征和形成演化过程。因此,笔者等在精细构造分析的基础上,分别在南段和北段选取和建立一条与挤压变形方向一致的横剖面,并应用 GeoSec 软件^①平衡恢复了各构造剖面变形前的初始构造以及后期的缩短变形过程。

3.1 龙门山北段平衡剖面分析

图 4(c)是在对横切龙门山北段的地震测线 L55^②(位置如图 1 中剖面 A—A' 所示)进行详细构造解析后建立的横剖面。从剖面中可以看出,龙门山北段从北西向南东主体由轿子顶推覆体、唐王寨推

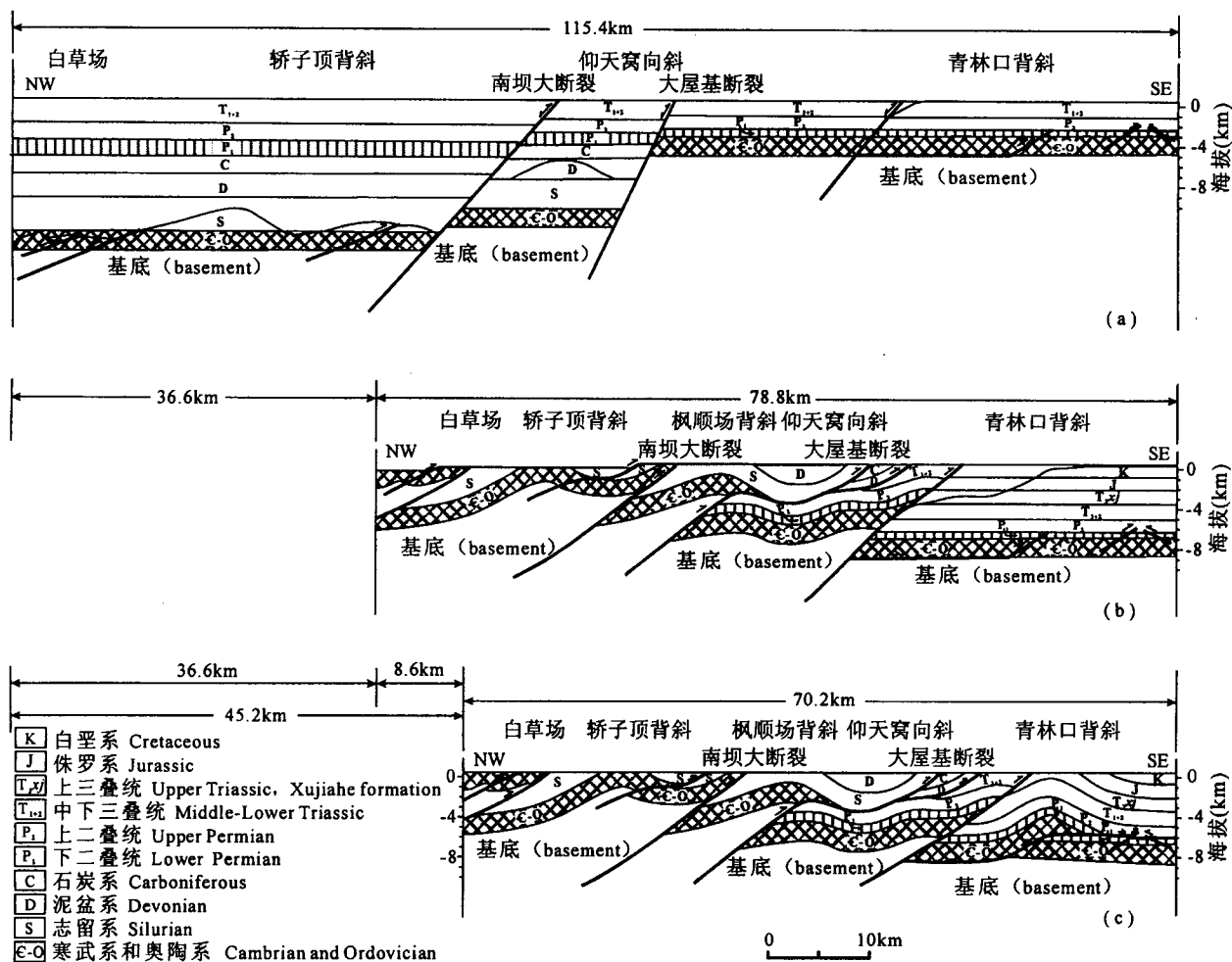


图 4 龙门山北段 L55 测线地震解释剖面及其恢复的平衡剖面

Fig. 4 Cross section of seismic profile (Line 55) across the northern Longmen Mountains and balanced and restored cross-sections

(a)——晚三叠世变形前构造平衡剖面;(b)——新生代变形前构造平衡剖面;(c)——L55 测线构造解释剖面(图 1 中 A—A')

(a)——Balanced and restored cross-section before Late Triassic;(b)——balanced and restored cross-section before Cenozoic;

(c)——cross section of seismic profile (Line 55) across the northern Longmen Mountains in present(A—A' in Fig. 1)

覆体和冲断前锋构造带等逆冲推覆构造单元组成;而且早期构造变形产生的岩片又经历后期构造变形的改造,并随新的岩片产生同步变形,如早期的逆冲岩片跟随晚期变形产生的冲断前锋构造一起变形,反映了构造变形多期性。这些推覆岩片受断层控制,沿主断层面滑脱。从北段推覆岩片的变形次序来看,是前展式发育的,后缘变形早,随着挤压作用的持续,在早期形成的岩片下和前缘发育新的推覆岩片。结合地层变形特征和构造变形期次的分析,借助 GeoSec 软件平衡恢复了该剖面的变形前的初始构造(图 4a)以及新构造变形前的构造(图 4b)。

晚三叠世以前,龙门山及其西侧的沉积受由早期被动大陆边缘裂解作用(志留纪和二叠纪的大陆伸展)形成的两条倾向北西的正断裂控制(图 4a)。大屋基断裂即龙门山中央断裂是其中的一条,其北西侧上盘地层的厚度是南东侧下盘的两倍多,上盘沉积有完整的早古生界,下盘却缺少志留系至石炭系,而且上盘的二叠系和中下三叠统也分别比下盘中的同套地层厚。南坝大断裂是控制北段沉积的另一条正断裂,其北西侧的上盘和南东的下盘发育了同样的古生界,上盘各地层的厚度相对较大。从而看出,两条主干断层从志留系就开始活动,在晚三叠世的构造反转之前,发育生长地层。

晚三叠世时期,扬子板块与秦岭的碰撞以及扬子板块与羌塘的碰撞的共同作用在龙门山产生了强烈的北西—南东方向挤压,使得早期伸展构造发生反转,龙门山及其西侧的地层大规模抬升和推覆,并遭受强烈剥蚀,形成褶皱冲断带和相应的前陆盆地。图 4(b)大体反映了北段经历早期变形后形成的剖面形态,相对于原始剖面(图 4a)整体缩短了 30 多千米,缩短率为 31.7%。新生代的构造变形使龙门山进一步抬升推覆,形成现今的构造(图 4c),又缩短了 8.6km,是新构造变形前剖面(图 4b)的 10.5%。相对于原始剖面(图 4a)龙门山北段整体缩短了 45.2km,缩短率为 39.2%。对比分析缩短量和缩短率,可以看出龙门山北段构造主体受早期晚三叠世变形控制,缩短量和缩短率较大;晚期的新生代构造变形在龙门山北段影响较小。

3.2 龙门山南段构造平衡剖面分析

图 5(b)是在地震测线(MB92-D2)、钻井资料、野外地质调查的基础上建立的横切龙门山南段构造剖面(位置如图 1 中剖面 B—B' 所示)。可以看出,南段具有基底卷入的厚皮冲断特征,其构造变形受一些主干断层控制,各岩片沿断层面挤压、推覆和抬升,部分岩片遭受剥蚀后出露前寒武纪基底。较之于北段,龙门山南段推覆的更高,地层遭受剥蚀相对更

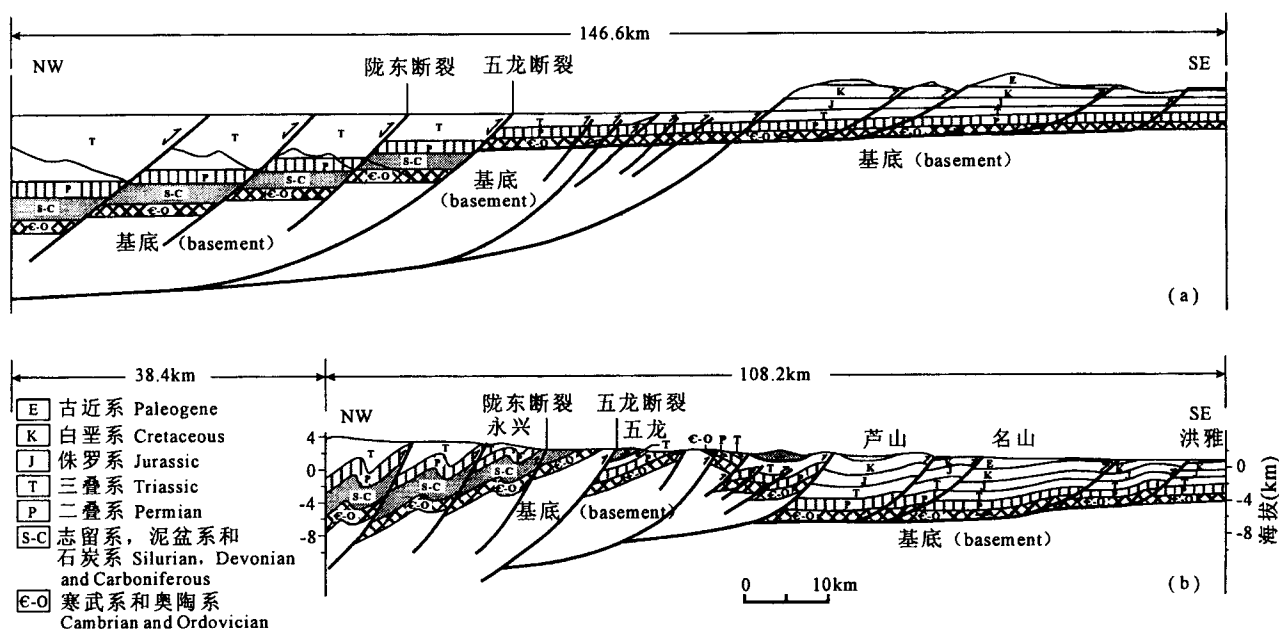


图 5 龙门山南段构造剖面及其恢复的平衡剖面

Fig. 5 Cross section across the southern Longmen Mountains and balanced and restored cross-section

(a) 龙门山南段变形前的初始构造剖面; (b) 龙门山南段变形构造剖面(图 1 中 B—B')

(a)—Balanced and restored cross-section before deformation; (b)—cross-section across the southern Longmen Mountains (B—B' in Fig. 1)

厉害,出露了基底;但龙门山南段的早古生代沉积地层分布与北段具有相似的特征,一系列早期正断层控制了古生代沉积,比如五龙断裂以西沉积有完整的古生界,而前龙门山带以及前陆盆地中缺失志留系至石炭系。

同样借助 GeoSec 软件,本文恢复了南段横剖面变形前的初始构造和沉积状态(图 5a)。可以看出,龙门山南段北西侧的地层发育受多条倾向北西的正断层控制,在五龙断裂即龙门山中央断裂两侧,地层厚度差异明显,北西侧沉积有下古生界,而南东侧是剥蚀区,缺失相应的地层。在五龙断裂西侧还发育有三条倾向北西的正断裂,各断裂同样表现出相似的同沉积特征。从地层的发育来看,南段的主干断层也是从志留系就开始活动,并控制了五龙断裂西侧的志留纪至三叠纪的沉积充填。

晚三叠世时期的羌塘地体与扬子板块的碰撞使龙门山产生了构造反转,龙门山抬升遭受剥蚀,后期的又遭受新生代构造变形再次强烈改造。从构造变形分析来看,北段广泛出现了侏罗系和下伏地层的角度不整合。在南段则明显不同,在灵关以东的大溪附近二者之间却是整合接触。这表明相对于北段,南段的中生代的构造变形相对较弱,或者现今南段的构造位置受到的挤压影响较小,变形强烈的地区可能相对位于更西侧,只是受到后期的构造变形作用后被强烈改造而无法准确的定位。因此,在龙门山南段,新生代的变形表现得更为突出,强烈改造了晚三叠世的构造变形,冲断前锋以断层相关褶皱形式向前陆方向扩展。龙门山南段经历两次构造变形后,整体缩短了接近 40km,相对于原始剖面的总体缩短率为 26.2%。

还有一点需要说明,龙门山南段飞来峰的成因存在争议,一种成因是西缘推覆体抬升后产生重力滑脱从而在前锋带上形成飞来峰(刘和甫等,1994);还有就是大位移的推覆体遭受剥蚀后残留形成(许志琴等,1992)。笔者等初步分析认为飞来峰的形成可能是西侧高位的推覆体重力滑脱的产物,未将其归入南段的推覆系统中,故本文未对飞来峰做平衡恢复。

4 讨论和结论

通过平衡剖面的分析,认为龙门山的发育的确是一个构造正反转过程,古生代和早中三叠世的沉积受被动陆缘上倾向北西的同沉积正断裂控制。晚三叠世时期受周缘陆块的碰撞产生的北西—南东向

挤压的影响,龙门山中的岩片沿早期正断层产生构造反转,沿断面滑脱、推覆、抬升和褶皱变形,早期沉积最终遭受剥蚀。新生代时期,受西南方向地体拼贴和板块碰撞的影响,龙门山再次遭受挤压抬升和缩短,并向前陆方向传播扩展,形成现今构造格局。

从构造变形的缩短率分析,可以看出在北段能明确地区分出两期构造变形,缩短量分别为 36.6km 和 8.6km,相应的缩短率为 31.7% 和 10.5%,整体缩短率为 39.2%;而南段却难以准确的厘定早期变形,主要体现晚期新生代的构造变形,两期变形后总体缩短量为 38.4km,缩短率为 26.2%。

在晚三叠世和新生代的两期板块碰撞的影响下,龙门山产生了两期褶皱冲断作用,但在南、北两段表现出显著不同的变形过程。龙门山北段表现复杂的逆冲推覆构造,能明确划分出两期构造变形,晚三叠世的变形强烈,而新生代的变形较弱。南段表现出基底卷入的叠瓦状冲断的特点,主要体现新生代的构造变形,早期的变形则被强烈改造。从南北两段的变形过程来看,龙门山整体上是呈前展式发育的。

致谢:中国石油天然气集团公司西南分公司的曾庆和杨光高工等参加了部分野外工作;中国石油天然气集团公司勘探开发研究院贾承造院士、南京大学卢华复教授、舒良树教授、张庆龙教授、王良书教授和浙江大学陈汉林教授在研究工作中给予了热情指导和帮助;中国地质调查局成都地质矿产研究所潘桂棠研究员审阅了本文初稿,提出了许多宝贵的意见和建议,特此致谢!

注 释

- ① 四川省地质局. 1978. 四川省地质图(1:50万). 中国地质图制印厂.
- ② GeoSec 是 Paradigm 公司开发的一套快速应用平衡剖面技术的工具软件.
- ③ 本文所有地震剖面 and 钻井资料均由中国石油天然气股份有限公司勘探开发研究院提供.

参 考 文 献

- 陈楚铭,卢华复,贾东,贾承造. 1999. 塔里木盆地北缘库车再生前陆褶皱逆冲带中丘里塔格前锋带的构造与油气. 地质论评, 45(4):423~433.
- 崔秉荃,龙学明,李元林. 1991. 川西拗陷沉降与龙门山的崛起. 成都地质学院学报, 18(1):39~44.
- 郭正吾,邓康龄,韩永辉. 1996. 四川盆地形成与演化. 北京:地质出版社, 48~138.
- 胡新伟,邓江红. 1996. 龙门山中段推覆构造带构造特征. 成都理工学院学报, 23(3):101~106.
- 黄汲清,陈炳蔚. 1987. 中国及邻区特提斯海的演化. 北京:地质出

版社, 109.

- 贾东, 陈竹新, 贾承造, 魏国齐, 李本亮, 张恒, 魏东涛, 沈杨. 2003. 龙门山褶皱冲断带构造解析与川西前陆盆地的发育. 高校地质学报, 9(3): 462~469.
- 金若谷. 1987. 四川龙门山北段晚二叠世大隆组放射虫岩及其形成环境. 地质论评, 33(3): 238~247.
- 林茂柄, 吴山. 1991. 龙门山推覆构造变形特征. 成都地质学院学报, 18(1): 46~54.
- 刘和甫, 梁慧社, 蔡立国, 沈飞. 1994. 川西龙门山冲断系构造样式与前陆盆地演化. 地质学报, 68(2): 100~117.
- 刘文均, 郑荣才, 李祥辉. 1999. 龙门山泥盆纪沉积盆地的古地理和古构造重建. 地质学报, 73(2): 109~119.
- 刘树根, 罗志立, 戴苏兰, Arne Dennis, Wilson C J L. 1995. 龙门山冲断带的隆生和川西前陆盆地的沉降. 地质学报, 9(3): 205~213.
- 龙学明. 1991. 龙门山中北段地史发展的若干问题. 成都地质学院学报, 18(1): 8~14.
- 卢华复, 董火根, 邓锡秋, 李鹏举, 吴葆青, 彭德林. 1989. 前龙门山前陆盆地推覆构造的类型和成因. 南京大学学报(地球科学), (4): 32~41.
- 卢华复, 贾承造. 2003. 库车—柯坪再生前陆冲断带构造. 北京: 科学出版社, 76~101.
- 罗志立. 1991. 龙门山造山带岩石圈演化的动力学模式. 成都地质学院学报, 18(1): 1~7.
- 潘桂荣, 徐耀荣, 王培生. 1983. 青藏高原东部边缘新生代构造. 青藏高原地质文集, 2(12): 129~142.
- 彭军, 陈洪德, 曾允孚. 2000. 龙门山南段前陆盆地中—新生代砂岩特征及物源分析. 中国区域地质, 19(1): 77~84.
- 王二七, 孟庆任, 陈智梁, 陈良忠. 2001. 龙门山断裂带印支期左旋走滑运动及其大地构造成因. 地学前缘, 8(2): 375~384.
- 吴山, 赵兵, 苟宗海, 邓明森, 邓江红, 胡新伟. 1999. 龙门山中—南段构造格局及其形成演化. 矿物岩石, 19(3): 82~85.
- 四川省地质矿产局. 1991. 四川省区域地质志. 北京: 地质出版社.
- 陶晓风. 1999. 龙门山南段推覆构造与前陆盆地演化. 成都理工学院学报, 26(1): 73~77.
- 许志琴, 侯立玮, 王宗秀. 1992. 中国松潘—甘孜造山带的造山过程. 北京: 地质出版社, 73~86.
- 杨逢清, 殷鸿福, 杨恒书, 赖旭龙. 1994. 松潘甘孜地块与秦岭褶皱带、扬子地台的关系及其发展史. 地质学报, 68(3): 208~218.
- 于苏俊. 2000. 龙门山北段推覆构造的几何特征及应变分析. 矿物岩石, 20(4): 67~74.
- 曾允孚, 李勇. 1995. 龙门山前陆盆地形成与演化. 矿物岩石, 15(1): 40~49.
- 张勤文. 1981. 松潘—甘孜印支地槽西康群复理石建造沉积特征及其大地构造背景. 地质论评, 27(5): 405~411.

References

- Burchfiel B C, Chen Zhiliang, Liu Yuping, Royden L H. 1995. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions, central China. International Geology Review, 37(8): 661~735.
- Bureau of Geology and Mineral Resources of Sichuan Province. 1991. Regional Geology of Sichuan Province. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese).
- Chen Chuming, Lu Huafu, Jia Dong, Jia Chengzao. 1999. Structures and petroleum accumulation in the Qiulitag thrust front of the Kuqa rejuvenated foreland fold—thrust belt on the northern margin of the Tarim basin. Geological Review, 45(4): 423~433

(in Chinese with English abstract).

- Chen Shefa, Wilson C J L. 1996. Emplacement of the Longmen Shan thrust—nappe belt along the eastern margin of the Tibetan Plateau. Journal of Structure Geology, 18(4): 413~430.
- Cui Bingquan, Long Xueming, Li Yuanlin. 1991. The subsidence of west Sichuan depression and the rise of Longmenshan Mountains. Journal of Chengdu College of Geology, 18(1): 39~44 (in Chinese with English abstract).
- Flöttmann Thomas, James Patrick. 1997. Influence of basin architecture on the style of inversion and fold—thrust belt tectonics—the southern Adelaide fold—thrust belt, South Australia. Journal of Structure Geology, 19(8): 1093~1110.
- Guo Zhengwu, Deng Kangling, Han Yonghui. 1996. The Formation and Development of Sichuan Basin. Beijing: Geological Publishing House, 48~138(in Chinese).
- Hu Xinwei, Deng Jianghong. 1996. Structure features of the nappe tectonic belt in the middle Longmen Mountains. Journal of Chengdu College of Geology, 23(3): 101~106 (in Chinese with English abstract).
- Huang Jiqing, Chen Binwei. 1987. The Evolution of the Tethys in China and Its Adjacent Regions. Beijing: Geological Publishing House, 109(in Chinese).
- Jia Dong, Lu Huafu, Cai Dongsheng, Wu Shimin, Shi Yangshen, Chen Chuming. 1998. Structural features of northern Tarim Basin: implications for regional tectonics and petroleum traps. AAPG Bulletin, 82(1): 147~159.
- Jia Dong, Chen Zhuxin, Jia Chengzao, Wei Guoqi, Li Benliang, Zhang Qie, Wei Dongtao, Shen Yang. 2003. Structural features of the Longmen Shan fold and thrust belt and the western Sichuan foreland basin, central China. Geological Journal of China Universities, 9(3): 462~469(in Chinese with English abstract).
- Jin Ruogu. 1987. Radiolarites and sedimentary environments of the late Permian Dalong formation in the northern sector of the Longmen Mountains, Sichuan Province. Geological Review, 33(3): 238~247(in Chinese with English abstract).
- Lin Maobing, Wu Shan. 1991. Deformational features of nappe structures in the Longmenshan Mountains. Journal of Chengdu College of Geology, 18(1): 46~54 (in Chinese with English abstract).
- Liu Hefu, Liang Huishe, Cai Liguang, Shen Fei. 1994. Structural systems of The Longmenshan thrust belt and evolution of the foreland basin in western Sichuan Province, China. Acta Geologica Sinica, 68(2): 100~117(in Chinese with English abstract).
- Liu Shugen, Luo Zhili, Dai Sulan, Arne Dennis, Wilson C J L. 1995. The uplift of Longmenshan thrust belt and subsidence of the western Sichuan foreland basin. Acta Geologica Sinica, 9(3): 205~213(in Chinese with English abstract).
- Liu Wenjun, Zheng Rongcai, Li Xianghui. 1999. Reconstruction of Palaeogeography and Palaeotectonics of a Devonian sedimentary basin in the Longmenshan area, Sichuan. Acta Geologica Sinica, 73(2): 109~119(in Chinese with English abstract).
- Long Xueming. 1991. Several questions of geochronic evolution in the mid-northern segment of Longmenshan Mountains. Journal of Chengdu College of Geology, 18(1): 8~14 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huafu, Dong Huogen, Deng Xiyang, Li Pengju, Wu Baoqing, Peng Delin. 1989. Types and origins of the thrusts and nappes in outer Longmenshan foreland basin. Journal of Nanjing University

- (Earth Sciences), (4): 32~41 (in Chinese with English abstract).
- Lu Huaifu, Jia Chengzao. 2003. Structures of Kuqa—Keping Rejuvenated Foreland Thrust Belt. Beijing: Science Press, 76~101 (in Chinese).
- Luo Zhili. 1991. The dynamical model of the lithospheric evolution in Longmen Shan orogenic belt. Journal of Chengdu College of Geology, 18(1): 1~7 (in Chinese with English abstract).
- Pan Guitang, Xu Yaorong, Wang Peisheng. 1983. The Cenozoic tectonics at the eastern margin of Qinghai—Xizang plateau. Contribution to the Geology of the Qinghai—Xizang (Tibet) Plateau, (12): 129~142 (in Chinese with English abstract).
- Peng Jun, Chen Hongde, Zeng Yunfu. 2000. Characteristics and provenance analysis of Mesozoic and Cenozoic sandstone in the foreland basin of the south part of Longmenshan Mountain. Regional Geology of China, 19(1): 77~84 (in Chinese with English abstract).
- Suppe J. 1983. Geometry and kinematics of fault-bend folding. American Journal of Science, 283: 684~721.
- Suppe J. 1983. Geometry and kinematics of fault-propagation folding. Ecologic Geological Helvetiae, 83(3): 684~721.
- Tao Xiaofeng. 1999. Evolution of nappe tectonic and foreland basin in the southern section of Longmen Mountains. Journal of Chengdu College of Geology, 26(1): 73~77 (in Chinese with English abstract).
- Wang Erqi, Meng Qingren, Chen Zhiliang, Chen Liangzhong. 2001. Early Mesozoic left-lateral movement along the Longmen Shan fault belt and its tectonic implications. Earth Science Frontiers, 8(2): 375~384 (in Chinese with English abstract).
- Wu Shan, Zhao Bing, Gou Zonghai, et al. 1999. The structure framework and its evolution in the middle—south section of Longmen Mountains. Journal of Mineralogy and Petrology, 19(3): 82~85 (in Chinese with English abstract).
- Xu Zhiqin, Hou Liwei, Wang Zongxiu. 1992. Orogenic Processes of the Songpan—Garzê Orogenic Belt of China. Beijing: Geological Publishing House, 73~86 (in Chinese).
- Yang Fengqing, Yin Hongfu, Yang Hengshu, Lai Xulong. 1994. The Songpan—Garzê massif: Its relationship with the Qinling fold belt and Yangtze platform and development. Acta Geologica Sinica, 68(3): 208~218 (in Chinese with English abstract).
- Yu Sujun. 2000. Geometrical characteristics and strain analysis of nappe structures in the northern section of Longmenshan. Journal of Mineralogy and Petrology, 20(4): 67~74 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Qinwen. 1981. The sedimentary features of the flysch formation of the Xikang group in the Indosinian Songpan—Garzê geosyncline and its geotectonic setting. Geological Review, 27(5): 405~411 (in Chinese with English abstract).
- Zeng Yunfu, Li Yong. 1995. The formation and evolution of Longmen Mountains foreland basin. Journal of Mineralogy and Petrology, 15(1): 40~49 (in Chinese with English abstract).

Balanced Cross-section Analysis of the Fold—Thrust Belt of the Longmen Mountains

CHEN Zhuxin¹⁾, JIA Dong¹⁾, ZHANG Qie¹⁾, WEI Guoqi²⁾, LI Benliang²⁾, WEI Dongtao¹⁾, SHEN Yang¹⁾

1) Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210093

2) PetroChina Company Limited, Beijing, 100083

Abstract

There are lots of discussions about the positive inversion process of the fold—thrust belt of the Longmen Mountains, but there are no direct evidences and quantitative analysis. Based on the analysis of strata and balanced cross-sections, writers discuss the positive inversion process of Longmen Mountains, which had been controlled by several NW trending syn-depositional normal faults from Silurian to Middle Triassic, and suffered NW—SE directional compression, uplift, thrust and denudation since Late Triassic. At least two major tectonic events of Late Triassic and early Cenozoic ages have occurred and formed two phases of the foreland fold—thrust belt, and had significantly different effects on the northern and the southern Longmen Mountains. The northern Longmen Mountains is composed of several southeastward thrusting nappes and thin-skinned imbricates of Cambrian—Triassic rocks, which deformed intensively during the Late Triassic events and got the 31.7% rate of shortening, while weakly since the early Cenozoic and got the 10.5% rate of shortening. However, the southern Longmen Mountains presents the basement-involved thrust structures that wholly represent the deformation features formed since early Cenozoic instead of during the Late Triassic, and made the 26.2% total rate of shortening.

Key words: Longmen Mountains; balanced cross-section; positive inversion structure; rate of shortening