

# 藏南定日地区上三叠统-古近系构造沉降分析与沉积盆地特征\*

李娟 胡修棉\*\*

LI Juan and HU XiuMian\*\*

内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210093

State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2013-05-25 收稿, 2013-07-30 改回.

Li J and Hu XM. 2013. Tectonic subsidence analysis of Late Triassic-Paleogene strata in Tingri area, Tibetan Tethyan Himalaya and evolution of sedimentary basins. *Acta Petrologica Sinica*, 29(11): 3843-3851

**Abstract** Tectonic subsidence history is an important part of the sedimentary basin analysis. This paper draws the tectonic subsidence history of Tibetan Tethyan Himalaya during Late Triassic-Paleogene. Our results show that the Tingri area of Tethyan Himalayan experienced a transitional subsidence from passive continental margin to peripheral foreland basin and can be divided into five phases. Stages I-III from Late Triassic to early Late Cretaceous are the period of passive margin basin with relatively low tectonic subsidence. The subsidence rate decreases exponentially, reflecting the stable tectonic subsidence process of the passive continental margin. Stage IV shows a late Late Cretaceous-Early Paleocene tectonic uplift followed by Late Paleocene stable tectonic subsidence. There are two possible explanations for the late Late Cretaceous-Early Paleocene tectonic uplift: one is mantle upwelling, another is plate flexure caused by the continental collision. Stage V of Eocene stage is the subsidence of peripheral foreland basin with increased subsidence rate.

**Key words** Tectonic subsidence; Late Triassic-Paleogene; Passive continental basin; Foreland basin; Tingri; Southern Tibet

**摘要** 构造沉降史研究是沉积盆地分析的一项重要内容。本文对藏南定日地区上三叠统-古近系进行了构造沉降史分析。研究表明:特提斯喜马拉雅定日地区晚三叠世-古近纪经历了由被动大陆边缘盆地沉降向周缘前陆盆地沉降的转换过程,根据构造沉降曲线特征,可划分为五个阶段。第 I-III 阶段即晚三叠世-晚白垩早期为被动大陆边缘沉降阶段,构造沉降曲线总体比较缓,沉降速率整体呈指数衰减,反映被动大陆边缘稳定的构造沉降过程。第 IV 阶段晚白垩晚期-古新世早期为构造隆升,古新世晚期再次为稳定构造沉降。对于晚白垩晚期-古新世早期的隆升有两种可能的解释,即德干地幔柱上涌引起的隆升或大陆碰撞板块挠曲引起的隆升。第 V 阶段始新世时期为印度-亚洲大陆碰撞形成的周缘前陆盆地沉降期,构造沉降曲线斜率增大,沉降速率增加,反映了该时期前陆盆地前渊区快速的沉降特征。

**关键词** 构造沉降; 晚三叠世-古近纪; 被动大陆盆地; 前陆盆地; 定日; 藏南

中图法分类号 P542

## 1 引言

盆地构造沉降史研究是沉积盆地分析的一项重要内容,系通过盆地沉降历史时期沉降量的定量分析再现盆地的地

质历史,进而讨论盆地沉降的构造驱动机制,研究盆地的形成和演化(王成善和李祥辉 2003; 李思田等, 2004; Xie and Heller, 2009)。藏南特提斯喜马拉雅定日地区属于印度板块北部大陆边缘,前人对特定时期的沉降史做过一些研究(Liu *et al.*, 1994; Jadoul *et al.*, 1998; Sciunnach and

\* 本文受国家重点基础研究发展规划项目(2012CB822001)、中国科学院战略性先导科技专项(B类,XDB03010106)和国家自然科学基金项目(41172092)联合资助。

第一作者简介:李娟,1987年生,女,硕士生,沉积地质学专业,E-mail: lijuan.ball@gmail.com

\*\* 通讯作者:胡修棉,1974年生,男,博士,教授,主要从事沉积地质学与青藏高原地质研究,E-mail: huxm@nju.edu.cn

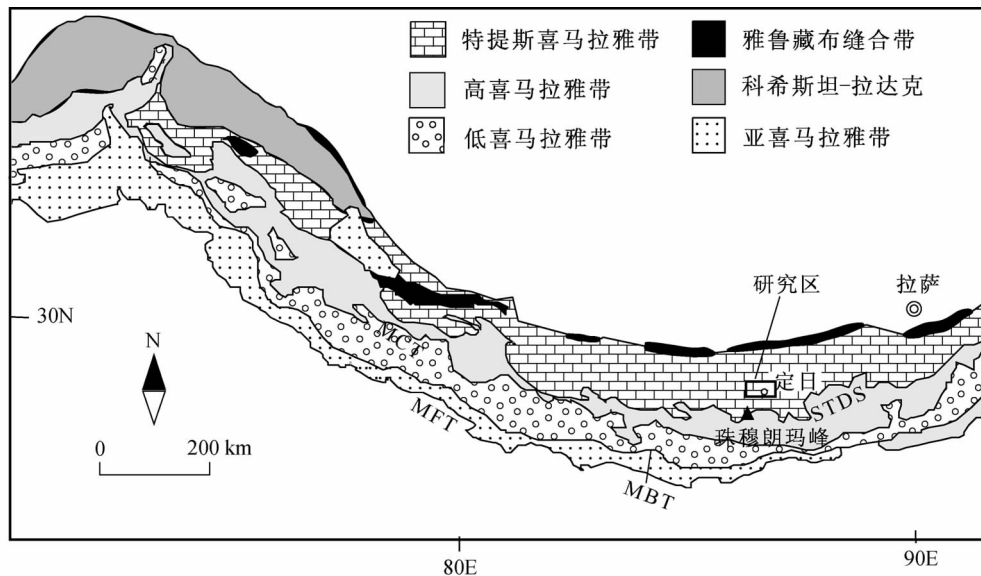


图1 藏南喜马拉雅构造分区图(据 Gansser, 1964 修改)

MCT-主中央逆冲断层; STDS-藏南拆离系; MBT-主边界断层; MFT-主前缘逆冲断层

Fig. 1 Simplified tectonic map of the Himalaya and southern Tibet (modified after Gansser, 1964)

MCT-main central thrust; STDS-south Tibetan detachment; MBT-main boundary thrust; MFT-main frontal thrust

Garzanti, 2011; Hu *et al.*, 2012)。近年来,藏南中生代-古近纪地层的研究进展较大,部分地层的时代进行了比较大的修改,初步建立了该地区的比较完善的地层系统,这就为开展系统、连续的构造沉降史分析奠定了基础。

本次研究主要综合了藏南定日地区上三叠统-古近系新的岩石地层学、古生物地层学、沉积学资料,在此基础上进行了构造沉降史分析,并结合前人研究成果,探讨了该区沉积盆地的性质。

## 2 区域地质概况

特提斯喜马拉雅带是喜马拉雅造山带的主要构造区域之一(Gansser, 1964)(图1),东西向延伸 1500km,其北侧边界为雅鲁藏布江缝合带,南侧边界为藏南拆离体系(Hodges *et al.*, 1996)。再向南为高喜马拉雅带,它由中高级变质岩组成。低喜马拉雅带位于高喜马拉雅南侧,二者之间为主中央逆冲断层,再向南为主边界逆冲断层分隔的亚喜马拉雅带。

藏南定日地区位于特提斯喜马拉雅带,属印度板块北部被动大陆边缘,主要由一套奥陶纪-始新世的近乎连续的海相地层组成。自早二叠世裂解之后(Garzanti, 1999; Sciunnach and Garzanti, 2011),一直到白垩纪末为稳定的被动大陆边缘发育阶段(余光明等, 1990; Garzanti *et al.*, 1999)。印度大陆从裂谷阶段向漂移阶段的转变发生在早白垩世(Powell *et al.*, 1988; Hu *et al.*, 2010),之后快速向北漂移,并于晚白垩世至古近纪与拉萨板块发生初始碰撞(Yin

and Harrison, 2000; 王成善等, 2003)造成藏南地区基底发生强烈的挠曲变形,形成喜马拉雅周缘前陆盆地(李国彪等, 2004; 蔡福龙等, 2008; 丁林, 2003, 2009; Hu *et al.*, 2012)。

西藏南部特提斯喜马拉雅定日地区是我国中生代海相地层的经典研究地区,前人已做过很多地层方面的研究(徐钰林等, 1990; Liu *et al.*, 1994; Jadoul *et al.*, 1998; Garzanti *et al.*, 1998; 李祥辉等, 2000; 李祥辉和王成善, 2005; Hu *et al.*, 2010, 2012),为本文构造沉降史分析奠定了基础。本次研究主要涉及藏南定日晚三叠世-古近纪地层,地层资料主要来自于课题组成员多年来的野外地质考察(表1、图2)。晚三叠世-早白垩世连续的地层序列位于协嘎尔-绒布寺公路扎西宗卧龙村附近的卧龙剖面(Jadoul *et al.*, 1998)(图3a, b)。晚白垩世-古近纪地层序列,主要出露于这普热山西段油下村附近,具体剖面位置见 Hu *et al.* (2012)(图3c-h)。

## 3 沉降史分析原理与方法

盆地的沉降包括构造沉降和非构造沉降,两者之和为盆地总沉降(王成善和李祥辉, 2003; 李思田等, 2004; Allen and Allen, 2005; Xie and Heller, 2009)。构造沉降是由构造原因引起的盆地沉降,即地壳或岩石圈动力学演化过程中产生的盆地沉降过程,包括岩石圈板块的变形、板块间的相互作用、板块内部的热作用和相互转换等原因引起的沉降。非构造沉降即沉积负荷引起的盆地沉降和全球海平面相对变化引起的盆地沉降。此外,盆地水体也是一种负荷,沉积盆地古

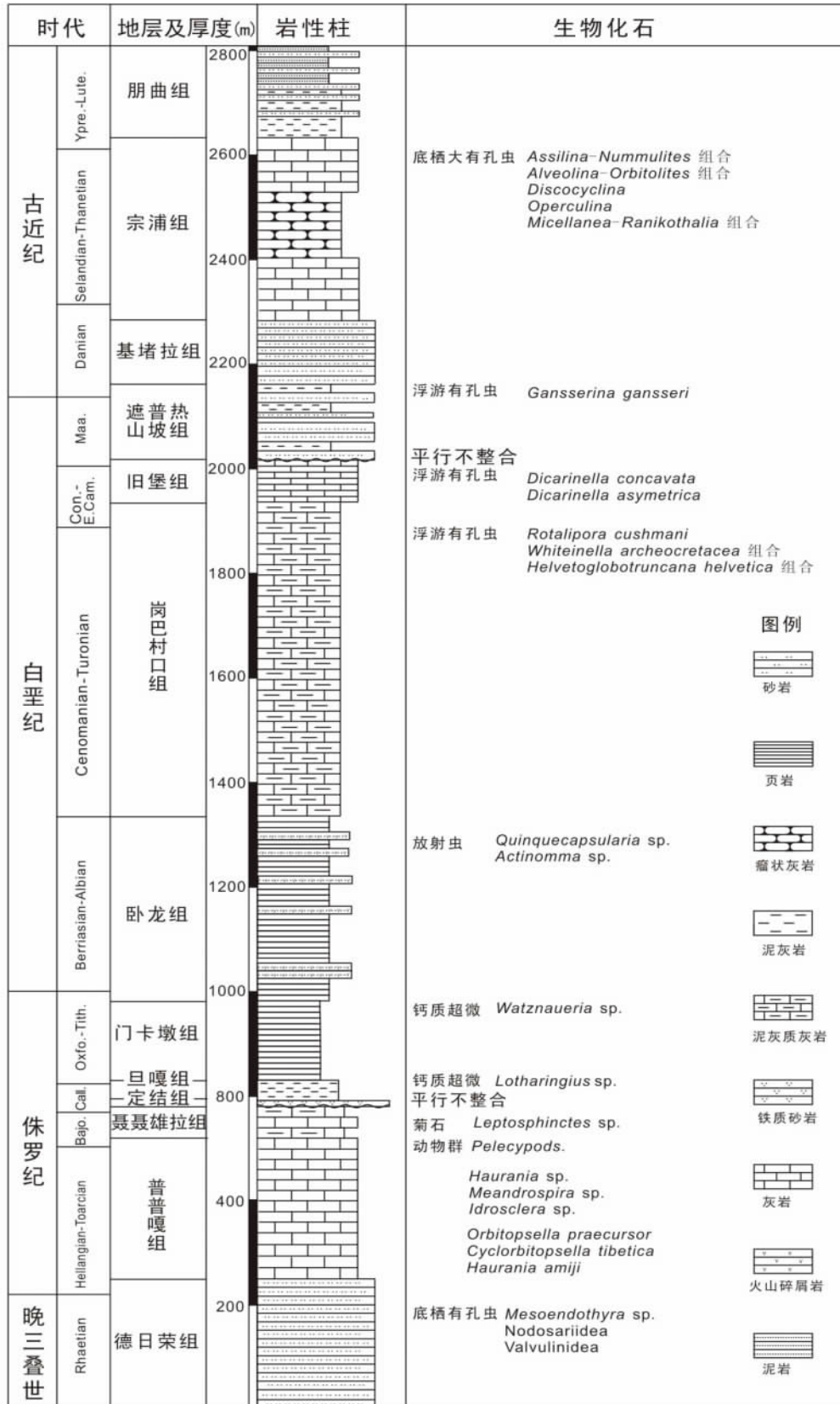


图2 藏南特提斯喜马拉雅定日地区上三叠统-古近系柱状图(据 Jadoul *et al.* ,1998; Hu *et al.* ,2012 修改)

Fig.2 Column of the strata from Late Triassic to Paleogene in Tingri , southern Tibet ( modified after Jadoul *et al.* ,1998; Hu *et al.* ,2012)

表1 藏南定日地区晚三叠世晚期-古近纪沉积地层特征(据 Jadoul *et al.*, 1998; Hu *et al.*, 2012 修改)Table 1 Summary on Late Triassic to Paleogene strata in Tingri area, Tibetan Tethyan Himalaya (modified after Jadoul *et al.*, 1998; Hu *et al.*, 2012)

时代		地层	岩性特征及沉积环境描述
系	统		
古近系	L. Ypresian-M. Lutetian	朋曲组 Pengqu	分为两段,下段恩巴段下部为黄绿色钙质泥灰岩,上部中薄层砂岩,钙质泥岩,上段扎果段为紫红色页岩夹透镜状砂岩。恩巴段下部为外陆棚沉积环境,上部为受风暴影响的陆棚沉积环境,扎果段为浅海内陆棚沉积
	L. Danian-L. Ypresian	宗浦组 Zongpu	厚层-块状瘤状灰岩或块状灰岩,含大量的生物化石,以底栖有孔虫为主,为碳酸盐岩缓坡沉积
	E. Danian-L. Danian	基堵拉组 Jidula	以钙质石英砂岩为主,极少量石英砾岩及页岩,为前三角洲-三角洲平原沉积
白垩系	L. Campanian-E. Danian	遮普热山坡组 Zhepure Shanpo	主要为硅质碎屑岩和碳酸盐岩,向上碎屑岩增多,下部为远陆坡沉积环境,向上为近陆坡浊积扇沉积
	E. Coniacian-L. Santonian	旧堡组 Jiubao	规则薄层状微晶灰岩为主,含浮游有孔虫,为远洋沉积
	L. Albian-E. Coniacian	岗巴村口组 Gangbacunkou	灰色钙质泥灰岩或泥灰质灰岩为主,含大量浮游有孔虫,为远洋-半远洋沉积
	L. Tithonian-L. Albian	卧龙组 Wolong	下部暗灰色粉砂岩过渡到火山岩屑砂岩,见生物扰动构造,含磷酸盐化放射虫,上部暗灰色硅质泥岩,含少量菊石,碳酸盐结核,为前三角洲-三角洲前缘沉积
侏罗系	E. Oxfordian-L. Tithonian	门卡墩组 Spiti	黑色页岩,含大量结核,菊石等化石,为浅海中陆棚沉积
	L. Callovian-E. Oxfordian	旦嘎组 Danger	灰色泥灰质灰岩,夹少量泥岩,含菊石,海绵骨针等化石,为滨外陆棚-远洋沉积环境
	L. Bathonian-L. Callovian	定结组 Ferruginous Oolite	鲕粒/砂质铁质岩或铁质鲕粒砂岩,含介形类,双壳等化石,为外滨陆棚沉积
	L. Toarcian-E. Bajocian	聂聂雄拉组 Laptal	浅灰色中-薄层微晶灰岩与泥灰岩或钙质页岩高频韵律为特色,含有孔虫,菊石及双壳等化石,为前三角洲-滨外陆棚沉积
	E. Hettangian-L. Toarcian	普普嘎组 Kioto	灰-深灰色薄-中层灰岩为主,或与石英砂岩、页岩互层,含丰富的化石,为碳酸盐岩台地沉积
上三叠统	E. Rhaetian-E. Hettangian	德日荣组 Zhamure	灰白色石英砂岩夹细砾岩,局部夹灰岩,为高能滨岸-浅海沉积

注: E-Early; M-Middle; L-Late

水深变化对盆地的沉降也有影响,尤其是在沉降幅度不大的情形下影响尤其明显。

沉降史的模拟方法有反演的回剥技术和正演的超压技术(李思田等,2004)。本文利用反演的回剥技术恢复盆地的埋藏史和沉降史。回剥技术就是利用岩石骨架厚度不变模型,按照从新到老的顺序逐层去掉各个时期上覆地层,通过压实校正、负载校正、古水深校正、海平面校正等一系列的校正方法获得各年代地层的原始沉积状况及盆地可能的原始形状(王成善和李祥辉,2003; Allen and Allen, 2005)。

### 3.1 压实校正

首先进行地层厚度的压实校正,即恢复到沉积时或埋藏过程中某一时期的厚度。在正常压实情况下,一般假设孔隙

度与深度满足以下指数关系:

$$\phi(y) = \phi_0 e^{-cy}$$

其中  $\phi(y)$  是深度  $y$  处的岩石孔隙度;  $\phi_0$  为地表 ( $y=0$ ) 时的孔隙度;  $c$  为压实系数。公式中的压实系数  $c$  以及地表孔隙度与岩性有关。本次研究以 Sclater and Christie (1980) 所给出的北海盆地单一岩性地表孔隙度和压实系数的标准(表2)为基础,并结合地层分层、厚度和岩性的百分含量的统计结果,以每种岩性厚度在该段地层中所占厚度百分比为权重系数,将该层段内各单一岩性的压实系数和地表孔隙度加权平均算出该段地层的平均地表孔隙度和平均压实系数。

假定压实前后岩石骨架保持不变,Allen and Allen (2005) 给出了去压实校正的公式,据此公式可获得沉积体的去压实厚度。



图3 藏南定日地区侏罗纪-古近纪地层野外照片

(a) 遮普热山坡剖面; (b) 卧龙剖面. K-普普嘎组; L-聂聂雄拉组; F-定结组; D-旦嘎组; W-卧龙组; S-门卡墩组; G-岗巴村口组; J-旧堡组; Zh-遮普热山坡组; Jd-基堵拉组; Zp-宗浦组

Fig. 3 Field photographs of the Jurassic to Paleogene strata in Tingri area

(a) -Zhepure Shanpo section; (b) -Wölong section. K-Kioto Formation; L-Laptal Formation; F-Ferruginous Oolite Formation; D-Dangar Formation; W-Wölong Formation; S-Spiti Formation; G-Gangbacunkou Formation; J-Jiubao Formation; Zh-Zhepure Shanpo Formation; Jd-Jidula Formation; Zp-Zongpu Formation

表2 北海盆地不同岩性的孔隙度-深度参数(据 Sclater and Christie, 1980)

Table 2 Exponents for different lithologies used in the subsidence analysis in North Sea (Sclater and Christie, 1980)

岩性	表面孔隙度 $\phi_0$ (%)	压实系数 $c$ ( $\text{km}^{-1}$ )	沉积物颗粒密度 $\rho_{sg}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
页岩	0.63	0.51	2720
砂岩	0.49	0.27	2650
泥质砂岩	0.56	0.39	2680

$$H = y_2' - y_1' = y_2 - y_1 - \frac{\phi_0}{c} (e^{-cy_1} - e^{-cy_2}) + \frac{\phi_0}{c} (e^{-cy_1'} - e^{-cy_2'})$$

式中:  $y_1, y_2$  是沉积体顶、底面的埋深;  $y_1', y_2'$  为沉积体去压实后的顶、底面的埋深;  $\phi_0$  是该层段的平均地表孔隙度;  $c$  是该层段的平均压实系数。公式两边均有未知数, 计算时可借助计算机采用迭代法求出结果, 即可算出各地层不同时期的去压实厚度, 而后通过计算求得的沉积体原始地层厚度  $H = (y_2' - y_1')$  即为研究区的总沉降量。

### 3.2 古水深校正

地质历史时期的盆地通常有一定的水深, 而且各个沉积

表3 藏南定日地区上三叠统-古近系构造沉降史分析地层资料

Table 3 Summary of stratigraphic datas used to tectonic subsidence analysis during Late Triassic to Paleogene in Tingri area, southern Tibet

地层名称	年龄 (Ma)	地层厚度 (m)	古水深 (m)	古水深误差 (m)
朋曲组	49 ~ 45	180	30 ~ 0	20
宗浦组	62 ~ 49	350 ~ 440	0 ~ 30	20
基堵拉组	64 ~ 62	75	150 ~ 0	50
遮普热山坡组	72 ~ 64	190	300 ~ 150	100 ~ 50
		缺失		
旧堡组	88 ~ 83	80	200 ~ 300	100
岗巴村口组	100 ~ 88	600	100 ~ 200	50
卧龙组	145 ~ 100	400	100 ~ 100	50
门卡墩组	158 ~ 145	120	100 ~ 100	50
旦嘎组	163 ~ 158	40	80 ~ 100	50
定结组	165 ~ 163	10	50 ~ 80	30
		缺失		
聂聂雄拉组	176 ~ 172	45	20 ~ 50	20
普普嘎组	200 ~ 176	190 ~ 220	10 ~ 20	5
德日荣组	204 ~ 200	250	20 ~ 10	5

单元时的古水深不同, 尤其是深水相区, 水深对沉降量的计算不可忽略。古水深 ( $W_d$ ) 主要是依据沉积相分析和古生态

分析 综合各种物理、化学条件推测得到的。藏南特提斯喜马拉雅定日地区晚三叠世晚期-古近纪各沉积单元的古水深数据见表 3。

### 3.3 海平面校正

全球海平面变化对构造沉降主要两方面影响:一方面,现今海平面高度被定为衡量沉降的参考面,另一方面是相对于现今低水位,过去高水位时期多出的海水本身也是一种负载,它会增加基底的负载沉降。这部分负载 ( $D_w$ ) 可用下式求得:

$$D_w = \frac{\rho_w}{\rho_m - \rho_w} \Delta S_L$$

其中  $\Delta S_L$  为相对现今海平面的变化量。本文海平面变化数据来源于 Kominz *et al.* (2008) 的全球海平面长期变化曲线。

### 3.4 沉积负载校正

地壳的均衡补偿作用是指当沉积盆地空间被沉积物充填时,沉积物本身的重量又使基底进一步下沉,形成被动增加的沉降,即沉积物负载沉降。均衡补偿的方式有两种,一种是 Airy 均衡模式,一种是挠曲模式。一般条件下多数采用较为简单的 Airy 均衡模式。

$$D_L = \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_m - \rho_w} H$$

其中  $H$  是经压实校正的沉积体的总厚度(总沉降量);  $\rho_s$ 、 $\rho_w$ 、 $\rho_m$  分别为沉积体的密度、海水的密度和地幔密度。

### 3.5 构造沉降量求取

盆地的总沉降包括构造沉降和非构造沉降,而非构造沉降由负载沉降和海平面变化引起的沉降构成,即

$$H + W_d - \Delta S_L = D_T + D_L + D_w$$

整理可得  $D_T = H + W_d - \Delta S_L - D_L - D_w$

$$\text{即 } D_T = \frac{\rho_m - \rho_s}{\rho_m - \rho_w} H - \frac{\rho_m}{\rho_m - \rho_w} \Delta S_L + W_d$$

## 4 构造沉降特征

根据上述计算方法,利用 Platte River Associates 公司的 BasinMod1-D 软件进行回剥,得到藏南特提斯喜马拉雅地区晚三叠世-古近纪的构造沉降曲线图(图 4)。从图中可以看出,藏南定日地区构造沉降史曲线具有明显的阶段性,根据构造沉降速率可分为五个阶段。

第 I 阶段晚三叠世(204 ~ 200Ma),即德日荣组沉积时期。此阶段沉降曲线斜率较大,沉降速率快为 51.45m/Myr,反映此时该地区可能受到一定拉张作用,使其沉降速率加快。

第 II 阶段早侏罗世-早白垩世(200 ~ 100Ma) 这一阶段构造沉降曲线斜率较小,沉降速率整体上较慢,反映该时期

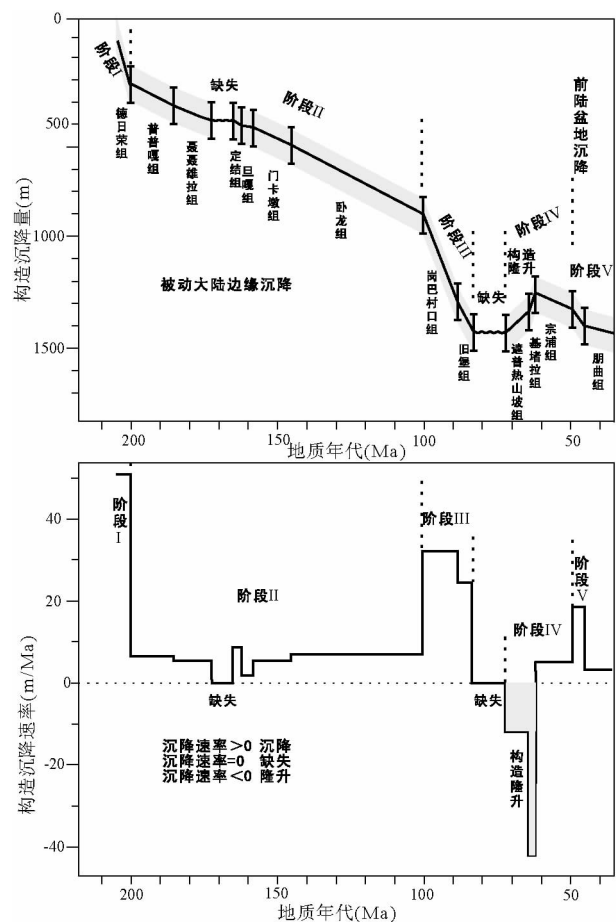


图 4 藏南定日地区晚三叠世-古近纪的构造沉降曲线和构造沉降速率曲线

Fig. 4 Curves of tectonic subsidence and subsidence rate in Tingri area during Late Triassic to Paleogene

藏南定日地区处于稳定的构造沉降期。普普嘎组沉积时期,构造沉降曲线明显变缓,斜率变小,延伸长,沉降速率减小,为 6.80m/Myr。聂聂雄拉组沉积时期,沉降速率进一步减小,为 5.15m/Myr。之后,为 8Myr 间隔的地层缺失期,缺失了 Bajocian 中晚期-Bathonian 早期的地层记录(Yin *et al.*, 2000)。Garzanti *et al.* (1993) 指出该地层不整合事件可能与区域裂谷作用以及广泛的火山作用有关。定结组沉积时期,沉降速率增大为 9.30m/Myr。至巨嘎组,沉降速率再次减小为 1.75m/Myr,门卡墩组沉积时期沉降速率稍微增大,为 5.25m/Myr,至卧龙组沉积期,沉积速率进一步增大为 7.35m/Myr。

第 III 阶段晚白垩世时期(100 ~ 83Ma),即岗巴村口组和旧堡组沉积时期。岗巴村口组沉积时期构造沉降曲线明显变陡,曲线斜率变大,沉降速率变快,为 33.13m/Myr。旧堡组沉积时期,沉降曲线稍微变缓,斜率变小,沉积速率变慢,为 23.85m/Myr。旧堡组沉积之后为地层缺失期,该地层缺失期一直持续至 72Ma(吴聪等,2011)。

第 IV 阶段晚白垩世-古新世时期(72~49Ma) 即遮普热山坡组、基堵拉组和宗浦组沉积时期。遮普热山坡组和基堵拉组沉积时期 构造沉降曲线出现明显的上凸, 沉降速率为负值, 且较大, 反映强烈的构造抬升, 但地层并未遭受风化剥蚀, 可能为水下抬升(Hu *et al.*, 2012)。宗浦组沉积时期, 沉降曲线再次下凹, 反映该区再次转为稳定沉降区, 沉降速率为 5.35m/Myr。

第 V 阶段始新世(49~45Ma) 时期, 即朋曲组沉积时期。这一阶段沉降曲线突然变陡, 斜率变大, 沉积速率增加, 为 19.30m/Myr。

## 5 讨论

前人研究认为, 藏南特提斯喜马拉雅带二晚叠世以来, 直到白垩纪末为稳定的被动大陆边缘发育阶段(余光明和王成善, 1990; Jadoul *et al.*, 1998; Garzanti, 1998, 1999; Corfield *et al.*, 2005; Sciunnach and Garzanti, 2011), 而古近纪为周缘前陆盆地发育阶段(李国彪等, 2004; 蔡福龙等, 2008; 丁林等, 2009; Hu *et al.*, 2012)。反映在藏南定日地区晚三叠世-古近纪构造沉降史曲线上, 则第 I 阶段-第 III 阶段为被动大陆边缘沉降期, 第 V 阶段为周缘前陆盆地沉降期, 而第 IV 阶段为过渡期, 属于被动大陆边缘沉降或前陆盆地沉降有待进一步讨论证实。据此现分别以被动大陆边缘沉降和前陆盆地沉降来分析探讨藏南定日晚三叠世-古近纪时期的构造沉降演化。

### 5.1 被动大陆边缘盆地沉降特征

一般而言, 被动大陆边缘构造沉降曲线整体分为两段: 早期沉降曲线较陡, 延伸短, 斜率大, 沉降速率快; 晚期曲线比较平缓、延伸长, 斜率较小, 沉降速率呈指数衰减(Xie and Heller, 2009)。早期较陡的一段, 一般解释为地壳伸展减薄作用引起的地壳快速沉降, 称为裂谷沉降, 对应于裂谷盆地发育阶段。晚期较缓的一段, 为地壳伸展后上地幔隆起的热冷却引起的地壳缓慢沉降, 称为后裂谷沉降, 对应于被动大陆边缘盆地发育阶段(Hendrie *et al.*, 1994; Kusznir *et al.*, 1996a, b; Xie and Heller, 2009)。

从图 4 上可以看出, 藏南定日地区晚三叠世-白垩纪末期 构造沉降曲线总体表现比较平缓, 斜率小, 沉降速率均小于 55m/Myr, 沉降速率慢, 符合被动大陆边缘后裂谷热沉降阶段特征, 但也经历了多期次的较小构造伸展作用, 表现为构造沉降曲线变陡, 曲线斜率变大, 即德日荣组、岗巴村口组沉积时期。至白垩纪末期-古新世时期, 印度大陆与欧亚大陆初始碰撞的发生, 被动大陆边缘沉降阶段结束。

### 5.2 前陆盆地沉降特征

印度大陆与欧亚大陆白垩纪末期-古近纪早期发生碰

撞, 形成特提斯喜马拉雅欠补偿前陆盆地(丁林, 2003; 丁林等, 2009; 李国彪等, 2004; 蔡福龙等, 2008; Hu *et al.*, 2012)。前陆盆地的沉降曲线, 总体呈上凸式, 初始斜率平缓, 沉降速率较慢, 后斜率突然增大, 沉降速率急剧增加(Xie and Heller, 2009)。藏南定日地区古近纪时期即第 V 阶段, 朋曲组沉积时期曲线斜率突然增大, 沉降速率急剧增加。印度-亚洲陆陆碰撞后, 随着造山带的不断前移, 前陆盆地向北迁移, 负载增大, 挠曲程度增强, 沉降速率变快, 而恩巴段下部远洋钙质泥灰岩沉积, 恩巴段上部薄层砂岩、钙质泥岩沉积(Hu *et al.*, 2012) 整体为较深水沉积, 以佐证其沉降速率较大, 形成较深水环境。

### 5.3 白垩纪末期-古近纪早期构造隆升

第 IV 阶段特提斯喜马拉雅定日地区的构造隆升, 以遮普热山坡组和基堵拉组沉积地层为代表。本文为这一时期的构造隆升提出了两种可能的解释: 地幔柱上涌作用引起的构造隆升或板块挠曲引起的构造隆升(Hu *et al.*, 2012)。

地幔柱理论认为地幔柱头部到达岩石圈底部, 对岩石圈底部的撞击以及热作用持续 10~20Myr, 之后喷发溢流玄武岩浆(Rainbird and Ernst, 2001; 朱弟成等, 2008; 裘碧波等, 2010; 夏瑛等, 2012), 持续的热作用可以造成基底隆升。目前尚不存在任何证据可以证明晚白垩世-古近纪早期定日地区存在地幔柱热点, 但是在距离其 1300km 的印度地区存在德干深源地幔柱热点, 其地幔柱头在 67~68Ma 前第一次到达地表, 并于白垩纪末期-古近纪早期喷发溢流玄武岩(Chenet *et al.*, 2007; Zhu *et al.*, 2008)。古地磁资料表明晚白垩世印度板块向北移动速率高达 18~20cm/yr(Klootwijk *et al.*, 1992; Copley *et al.*, 2010; Van Hinsbergen *et al.*, 2011), 假设 Reunion 热点此时一直处于稳定状态, 则印度大陆在 10Myr 内即在德干玄武岩浆喷发之前, 可向北漂移 1800~2000km, 而特提斯喜马拉雅地区与德干高原之间的距离仅为 1900km。因此, 藏南定日地区白垩纪末期-古近纪初期很可能位于德干地幔柱热点之上, 从而发生了构造隆升。

另一种观点则认为陆-陆发生碰撞后, 形成特提斯喜马拉雅周缘前陆盆地, 由于逆冲负载和构造挤压的影响, 印度被动大陆边缘将发生挠曲现象, 在前陆盆地的前隆区域产生构造抬升(DeCelles and Giles, 1996; Sinclair, 1997; 杨永泰, 2011), 而遮普热山坡组和基堵拉组沉积时期正好处于前陆盆地的前隆区, 由此发生了隆升。在这种理论模式下, 特提斯喜马拉雅定日地区白垩纪末期-古近纪早期的构造隆升, 也可能是印度大陆与欧亚大陆碰撞后, 印度大陆边缘发生挠曲作用的结果。遮普热山坡组钙质泥岩平行不整合于旧堡组远洋灰岩之上, 与基堵拉组显示向上变浅的地层序列。此模式如得到证实, 则旧堡组与遮普热山坡组之间的不整合, 代表了前陆盆地的启动, 指示前陆盆地前隆的隆起。

在定日地区, 恩巴段(朋曲组下段)中, 最年轻的亚洲来

源的锆石年龄为 50Ma (Najman *et al.*, 2010; Hu *et al.*, 2012) 限定了印度-亚洲陆陆碰撞的最小年龄, 反映在地层上则陆陆初始碰撞发生在恩巴段下部地层中。对于是碰撞还是地幔柱热点造成的隆升, 目前尚不能确定, 还在进一步研究中。

## 6 结论

通过综合新的岩石地层学、古生物地层学和沉积学资料, 对藏南定日地区上三叠统-古近系进行了构造沉降史分析, 分析表明藏南定日地区经历了由被动大陆边缘盆地沉降向周缘前陆盆地沉降的演化过程, 晚三叠世-晚白垩世早期为被动大陆边缘沉降, 而古新世时期为前陆盆地沉降。晚三叠世-晚白垩世早期为被动大陆边缘沉降阶段, 构造沉降曲线总体比较平缓, 延伸长, 斜率较小, 沉降速率整体呈指数衰减, 反映被动大陆边缘稳定的构造沉降过程。晚白垩世晚期-古新世早期为构造隆升段, 对于其隆升有两种可能的解释, 即地幔柱上涌引起的隆升或板块碰撞挠曲引起的隆升, 古新世晚期再次为稳定构造沉降。古新世时期为周缘前陆盆地沉降期, 构造沉降曲线斜率增大, 沉降速率增加, 反映了该时期前陆盆地快速的沉降特征。

## References

Allen PA and Allen JR. 2005. Basin Analysis: Principles and Applications. Oxford: Blackwell Publishing Ltd.

Cai FL, Ding L, Zhang QH, Xu XX, Yue YH, Zhang LY and Xu Q. 2008. Provenance and tectonic evolution of the Yalu-Zangbo peripheral foreland basin. *Acta Petrologica Sinica*, 24(3): 430-446 (in Chinese with English abstract)

Chenet AL, Quidelleur X, Fluteau F, Courtillot V and Bajpal S. 2007.  $^{40}\text{K}$ - $^{40}\text{Ar}$  dating of the Main Deccan large igneous province: Further evidence of KTB age and short duration. *Earth and Planetary Science Letters*, 263(1-2): 1-15

Copley A, Avouac JP and Royer JY. 2010. India-Asia collision and the Cenozoic slowdown of the Indian plate: Implications for the forces driving plate motions. *Journal of Geophysics Research: Solid Earth*, 115(B3): B03410, doi: 10.1029/2009JB006634

Corfield RI, Watts AB and Searle MP. 2005. Subsidence history of the north Indian continental margin, Zaskar-Ladakh Himalaya, NW India. *Journal of the Geological Society*, 162(1): 135-146

DeCelles PG and Giles KA. 1996. Foreland Basin Systems. *Basin Research*, 8(2): 105-123

Ding L. 2003. Paleocene deep-water sediments and radiolarian faunas: Implications for evolution of Yarlung-Zangbo foreland basin, southern Tibet. *Science in China (Series D)*, 46(1): 84-96

Ding L, Cai FL, Zhang QH, Zhang LY, Xu Q, Yang D, Liu DL and Zhong DL. 2009. Provenance and tectonic evolution of the foreland basin systems in the Gandese-Himalayan collisional orogen belt. *Chinese Journal of Geology*, 44(4): 1289-1311 (in Chinese with English abstract)

Gansser A. 1964. *Geology of the Himalayas*. London, New York: Interscience Publishers

Garzanti E, Sciunnach D, Gaetani M *et al.* 1993. Discussion on subsidence history of the North Indian continental margin, Zaskar-Ladakh Himalaya, NW India. *Journal of the Geological Society*,

162: 889-892

Garzanti E, Nicora A and Rettori R. 1998. Permo-triassic boundary and lower to middle Triassic in South Tibet. *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(2-3): 143-157

Garzanti E, Le Fort P and Sciunnach D. 1999. First report of Lower Permian basalts in South Tibet: Tholeiitic magmatism during break-up and incipient opening of Neotethys. *Journal of Asian Earth Sciences*, 17(4): 533-546

Hendrie DB, Kuszniir NJ, Morley CK and Ebinger CJ. 1994. Cenozoic extension in northern Kenya: A quantitative model of rift basin development in the Turkana region. *Tectonophysics*, 236(1-4): 409-438

Hodges KV, Parrish RR, Searle MP. 1996. Tectonic evolution of the central Annapurna Range, Nepalese Himalayas. *Tectonics*, 15(6): 1264-1291

Hu XM, Jansa L, Chen L, Griffin WL, O'Reilly SY and Wang JG. 2010. Provenance of Lower Cretaceous Wölong volcanics in the Tibetan Tethyan Himalaya: Implications for the final breakup of eastern Gondwana. *Sedimentary Geology*, 223(3-4): 193-205

Hu XM, Sinclair HD, Wang JG, Jiang HH and Wu FY. 2012. Late Cretaceous-Paleogene stratigraphic and basin evolution in the Zhepure Mountain of southern Tibet: Implications for the timing of India-Asia initial collision. *Basin Research*, 24(5): 520-543

Jadoul F, Berra F and Garzanti E. 1998. The Tethys Himalayan passive margin from Late Triassic to Early Cretaceous (South Tibet). *Journal of Asian Earth Sciences*, 16(2-3): 173-194

Klootwijk CT, Gee JS, Peirce JW, Smith GM and McFadden PL. 1992. An early India-Asia contact: Paleomagnetic constraints from Ninetyeast Ridge, ODP Leg 121; with Suppl. Data 92-15. *Geology*, 20: 395-398

Kominz MA, Browning JV, Miller KG, Sugarman PJ, Mizintseva S and Scotese CR. 2008. Late Cretaceous to Miocene sea-level estimates from the New Jersey and Delaware coastal plain coreholes: An error analysis. *Basin Research*, 20(2): 211-226

Kuszniir NJ, Kovkhuto AM and Stephenson RA. 1996a. Syn-rift evolution of the Pripyat Trough: Constraints from structural and stratigraphic modelling. *Tectonophysics*, 268(1-4): 221-236

Kuszniir NJ, Stovba SM, Stephenson RA and Poplavskii KN. 1996b. The formation of the northwestern Dniepr-Donets Basin: 2-D forward and reverse syn-rift and post-rift modelling. *Tectonophysics*, 268(1-4): 237-255

Li GB, Wan XQ, Ding L, Liu WC and Gao LF. 2004. The paleogene foreland basin and sedimentary responses in the Southern Tibet: Analysis on sequence stratigraphy. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(3): 455-464 (in Chinese with English abstract)

Li ST, Xie XL, Wang H, Jiao YQ, Ren JY, Zhuang XG and Lu YC. 2004. *Sedimentary Basin Analysis: Principle and Application*. Beijing: Higher Education Press, 275-305 (in Chinese)

Li XH, Wang CS and Hu XM. 2000. Latest Non-carbonate marine sediment in Tibet: Significance to closure of the Neo-Tethys Sea. *Acta Geologica Sinica*, 75(3): 314-321 (in Chinese with English abstract)

Li XH and Wang CS. 2005. Reinterpretation of the Jurassic across the main Himalayan ridge north of Nyalam, southern Tibet, China. *Geological Bulletin of China*, 24(12): 1121-1126 (in Chinese with English abstract)

Liu GH and Einsele G. 1994. Sedimentary history of the Tethyan basin in the Tibetan Himalayas. *Geologische Rundschau*, 83(1): 32-61

Najman Y, Appel E, Boudagher-Fadel M, Bown P, Carter A, Garzanti E, Godin L, Han JT, Liebke U, Oliver G, Parrish R and Vezzoli G. 2010. Timing of India-Asia collision: Geological biostratigraphic, and palaeomagnetic constraints. *Journal of Geophysical Research*, 115(B12): B12416, doi: 10.1029/2010JB007673

Powell CMA, Roots SR and Veivers JJ. 1988. Pre-breakup continental extension in East Gondwanaland and the early opening of the eastern Indian Ocean. *Tectonophysics*, 155(1-4): 261-283

Qiu BB, Zhu DC, Zhao ZD and Wang LQ. 2010. The westward



- extension of Comei fragmented large igneous province in southern Tibet and its implications. *Acta Petrologica Sinica*, 26(7): 2207 – 2216 (in Chinese with English abstract)
- Rainbird RH and Ernst RE. 2001. The sedimentary record of mantle-plume uplift. In: Ernst RE and Buchan KL (eds.). *Mantle Plumes: Their Identification Through Time*. Geological Society of America Special Paper. Boulder, Colorado: Geological Society of America Special, 352: 227 – 246
- Sciunnach D and Garzanti E. 2011. Subsidence history of the Tethys Himalaya. *Earth-Science Reviews*, 111(1–2): 179 – 198
- Sclater JG and Christie PAF. 1980. Continental stretching: An explanation of the post – mid Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin. *Journal of Geophysical Research*, 85: 3711 – 3739
- Sinclair HD. 1997. Tectonostratigraphic model for underfilled peripheral foreland basins: An Alpine perspective. *Geological Society of America Bulletin*, 109(3): 324 – 346
- Van Hinsbergen DJJ, Steinberger B, Doubrovine PV and Gassmüller R. 2011. Acceleration and deceleration of India-Asia convergence since the Cretaceous: Roles of mantle plumes and continental collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B16): B06101, doi: 10.1029/2010JB008051
- Wang CS and Li XH. 2003. *Sedimentary Basin: From Principles to Analyses*. Beijing: Higher Education Press, 1 – 378 (in Chinese)
- Wang CS, Li XH and Hu XM. 2003. Age of initial collision of India with Asia: Review and constrains from sediments in southern Tibet. *Acta Geologica Sinica*, 77(1): 16 – 24 (in Chinese with English abstract)
- Wu C, Shi YK and Hu XM. 2011. The disconformity in the Late Cretaceous strata at Tingri, southern Tibet and its age constrained by planktonic foraminifera. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 28(4): 381 – 402 (in Chinese with English abstract)
- Xia Y, Zhu DC, Zhao ZD, Wang Q, Yuan SH, Chen Y and Mo XX. 2012. Whole-rock geochemistry and zircon Hf isotope of the OIB-type mafic rocks from the Comei Large Igneous Province in southeastern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 28(5): 1588 – 1602 (in Chinese with English abstract)
- Xie XY and Heller PL. 2009. Plate tectonics and basin subsidence history. *Geological Society of America*, 121(1–2): 55 – 64
- Xu YL, Wan XQ, Gou ZH *et al.* 1990. *Biostratigraphy of Xizang (Tibet) in the Jurassic, Cretaceous and Tertiary Periods*. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1 – 147 (in Chinese)
- Yang YT. 2011. Subsidence mechanisms and stratigraphic models of foreland basins. *Acta Petrologica Sinica*, 27(2): 531 – 544 (in Chinese with English abstract)
- Yin A and Harrison M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211 – 280
- Yin JY, Callomon JH and Enay R. 2000. A hiatus of 8my duration in the Middle Jurassic with ammonite succession in Tethyan Himalaya (South Tibet). *Geobios*, 33(2): 201 – 210
- Yu GM and Wang CS. 1990. *Sedimentary Geology of Tethys, Tibet*. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese)
- Zhu DC, Mo XX, Pan GT, Zhao ZD, Dong GC, Shi YR, Liao ZL, Wang LQ and Zhou CY. 2008. Petrogenesis of the earliest Early Cretaceous mafic rocks from the Cona area of the eastern Tethyan Himalaya in south Tibet: Interaction between the incubating Kerguelen plume and the eastern Greater India lithosphere? *Lithos*, 100(1–4): 147 – 173
- Zhu DC, Mo XX, Wang LQ, Zhao ZD and Liao ZL. 2008. Hotspot-ridge interaction for the evolution of Neo-Tethys: Insights from the Late Jurassic-Early Cretaceous magmatism in southern Tibet. *Acta Petrologica Sinica*, 24(2): 225 – 237 (in Chinese with English abstract)

#### 附中文参考文献

- 蔡福龙, 丁林, 张清海, 徐晓霞, 岳雅慧, 张利云, 许强. 2008. 雅鲁藏布江周缘前陆盆地物源分析及构造演化. *岩石学报*, 24(3): 430 – 446
- 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, 蔡福龙, 张清海, 张利云, 许强, 杨迪, 刘德亮, 钟大赉. 2009. 冈底斯-喜马拉雅碰撞造山带前陆盆地系统及构造演化. *地质科学*, 44(4): 1289 – 1311
- 李国彪, 万晓樵, 丁林, 刘文灿, 高莲凤. 2004. 藏南古近纪前陆盆地演化过程及其沉积响应. *沉积学报*, 22(23): 455 – 464
- 李思田, 解习农, 王华, 焦养泉, 任建业, 庄新国, 陆永潮. 2004. 沉积盆地分析基础与应用. 北京: 高等教育出版社, 275 – 305
- 李祥辉, 王成善, 胡修棉. 2000. 西藏最新非碳酸盐海相沉积及其对新特提斯关闭的意义. *地质学报*, 75(3): 314 – 321
- 李祥辉, 王成善. 2005. 藏南聂拉木北部喜马拉雅山主脊带侏罗系重解. *地质通报*, 24(12): 1121 – 1126
- 裴碧波, 朱弟成, 赵志丹, 王立全. 2010. 藏南措美残余大火成岩省的西延及意义. *岩石学报*, 26(7): 2207 – 2216
- 王成善, 李祥辉. 2003. *沉积盆地分析原理与方法*. 北京: 高等教育出版社, 1 – 378
- 王成善, 李祥辉, 胡修棉. 2003. 再论印度-亚洲大陆碰撞的启动时间. *地质学报*, 77(1): 16 – 24
- 吴聪, 史宇坤, 胡修棉. 2011. 藏南定日上白垩统平行不整合界线及其浮游有孔虫时代约束. *微体古生物学报*, 28(4): 381 – 402
- 夏瑛, 朱弟成, 赵志丹, 王青, 袁四化, 陈越, 莫宣学. 2012. 藏东南措美大火成岩省中 OIB 型镁铁质岩的全岩地球化学和锆石 Hf 同位素. *岩石学报*, 28(5): 1588 – 1602
- 徐钰林, 万晓樵, 苟宗海等. 1990. 西藏侏罗、白垩、第三纪生物地层. 武汉: 中国地质大学出版社, 1 – 147
- 杨永泰. 2011. 前陆盆地沉降机理和地层模型. *岩石学报*, 27(2): 531 – 544
- 余光明, 王成善. 1990. 西藏特提斯沉积地质. *地质专报(三)*, 12. 北京: 地质出版社
- 朱弟成, 莫宣学, 王立全, 赵志丹, 廖忠礼. 2008. 新特提斯演化的热点与洋脊相互作用: 西藏南部晚侏罗世-早白垩世岩浆作用推论. *岩石学报*, 24(2): 225 – 237