

# 藏东南始新世剑川盆地西缘沉积特征及构造意义

廖程<sup>1,2</sup>, 杨天南<sup>1</sup>, 梁明娟<sup>1</sup>, 信迪<sup>1</sup>, 董猛猛<sup>1</sup>, 薛传东<sup>3</sup>

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;  
3. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南昆明 650093)

**摘要:** 印度-欧亚大陆碰撞作用形成了以西藏-喜马拉雅造山带为主体的正向碰撞带和以“三江”造山带为主体的斜向碰撞带,二者之间的现代分界线为喜马拉雅东构造结。剑川盆地是目前已确定的、位于斜向碰撞带最南端的始新世盆地。通过对盆地西缘4条剖面的详细沉积学研究,发现盆地充填过程分为2个阶段。钾质-超钾质火山活动(37~34 Ma)之前的充填物源自盆地西南侧,由冲积扇扇根、扇中亚相逐渐转变为三角洲平原亚相;火山活动之后的充填物源自盆地北西侧,形成冲积扇扇根、扇中亚相。结合盆地充填期间西侧基底构造变形特点,认为剑川盆地为始新世前陆盆地。始新世期间,剑川盆地与藏东、藏北诸多始新世前陆盆地一样,可能属于正向碰撞带的一部分,其与斜向碰撞带之间的界线位于剑川盆地以南。由于印度地块持续向北迁移,挤入到欧亚大陆内部,导致斜向碰撞带逐渐向北生长。

**关键词:** 斜向碰撞带; 沉积序列; 前陆盆地; 剑川盆地; 始新世

中图分类号: P512.2; P542.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2021)04-0729-18

## Sedimentary geology of the western margin of the Eocene Jianchuan basin in southeast Tibetan Plateau and its tectonic implications

LIAO Cheng<sup>1,2</sup>, YANG Tian-nan<sup>1</sup>, LIANG Ming-juan<sup>1</sup>, XIN Di<sup>1</sup>, DONG Meng-meng<sup>1</sup> and XUE Chuan-dong<sup>3</sup>

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 3. Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** The India-Eurasia collision led to the formation of an orthogonal collisional belt and an oblique collisional belt, which are the Tibet-Himalaya and the Sanjiang orogenic belts, respectively, and are now separated by the east Himalaya syntax. The Eocene Jianchuan basin is located in the southernmost region of the oblique collisional belt. Detailed sedimentary study of four profiles along the western margin of the Jianchuan basin revealed two stages of the basin infilling process, which were separated by the 37~34 Ma potassic volcanism. The earlier stage infillings were sourced from the southwest, and displayed upper and middle fan, and/then delta plain facies. The later stage infillings were derived from the northwest regions of the basin, which formed upper fan facies. Combined with the Eocene structures of the basin's basement, the authors hold that the Jianchuan basin is an Eocene foreland one. The Eocene Jianchuan foreland basin, along with its numerous equivalents in eastern and central Tibet, likely was previously located in the orthogonal collisional belt. The boundary between the orthogonal and oblique collisional belts might have been located in the south of the Jianchuan basin during the Eocene. The changes in tectonic location of

收稿日期: 2020-11-26; 接受日期: 2021-05-06; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家重点研发计划项目(“973”项目)(2015CB452601, 2016YFC0600306-4)

作者简介: 廖程(1989-), 男, 博士研究生, 区域地质调查、构造地质学专业, E-mail: Liao.c.wind@qq.com; 通讯作者: 杨天南(1966-), 男, 博士, 研究员, 从事造山带变形、变质、成矿作用研究, E-mail: yangtn@cags.ac.cn.

网络首发时间: 2021-06-03; 网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20210602.1338.002.html>

the Jianchuan foreland basin indicate the successive northward growth of the oblique collisional belt due to the continuous northward indenting of the India continent into Eurasia.

**Key words:** oblique collisional belt; sedimentary succession; foreland basin; Jianchuan basin; Eocene

**Fund support:** National Key Basic Research Program of China (“973” Program) (2015CB452601, 2016YFC0600306-4)

印度-欧亚大陆碰撞形成了以青藏高原-喜马拉雅造山带为主体的正向碰撞带以及以“三江”造山带为主体的斜向碰撞带 (Molnar and Tapponnier, 1975;

Mattauer *et al.*, 1999), 两者以喜马拉雅东构造结为界 (图 1)。这两个碰撞带新生代变形样式存在显著差异: 正向碰撞带总体表现为一系列与碰撞带走向

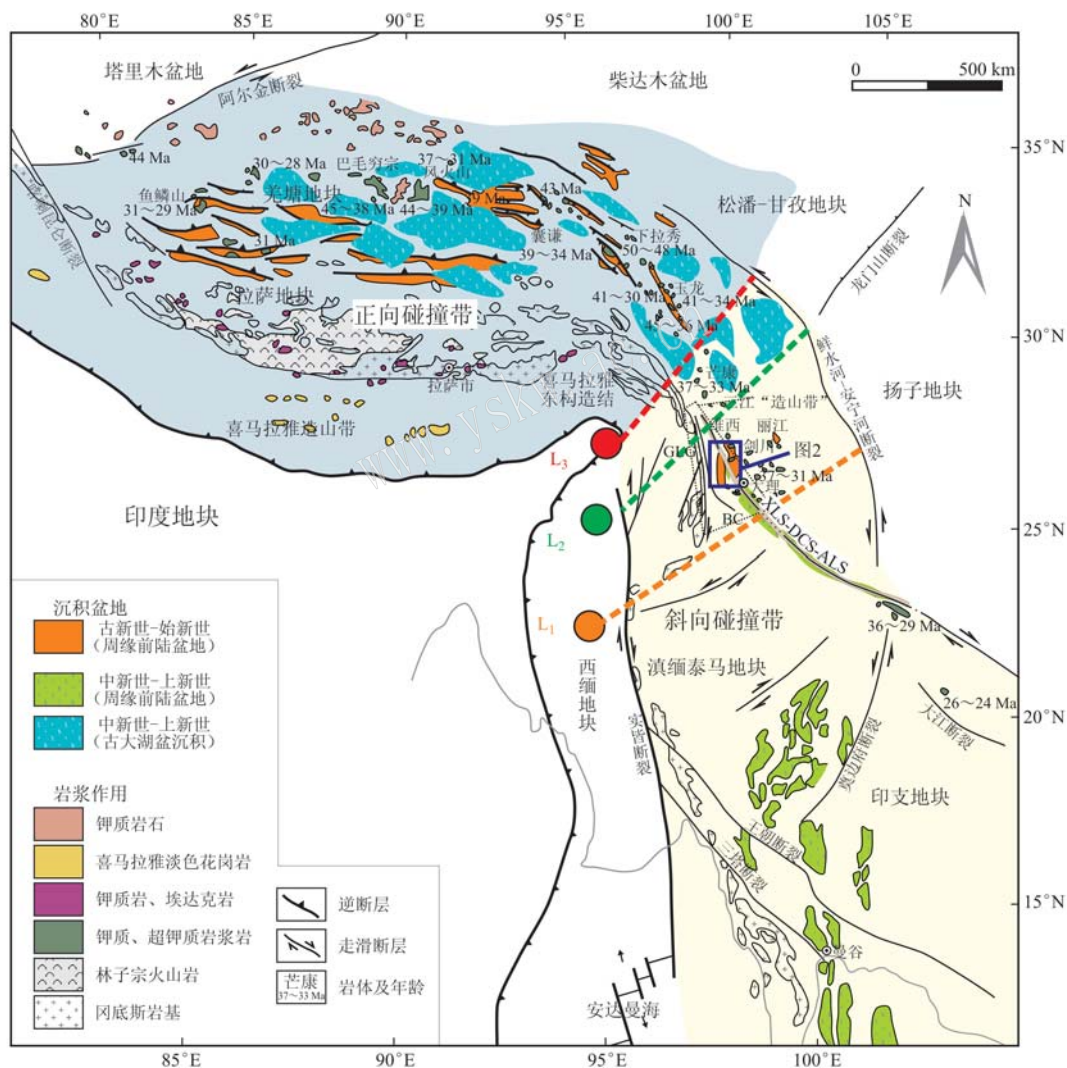


图 1 印度-欧亚大陆碰撞带构造简图 [据 Tong 等 (2019) 修改]

Fig. 1 Tectonic sketch map of the India-Eurasia collisional belt (modified after Tong *et al.*, 2019)

GLG—高黎贡剪切带; BC—碧罗雪山-崇山剪切带; XLS-DCS-ALS—雪龙山-点苍山-哀牢山剪切带; 橙、绿、红圆圈分别代表东喜马拉雅构造结始新世时期、中新世时期和现今的大致位置 (相对现今欧亚大陆的位置);  $L_1$ 、 $L_2$  和  $L_3$  代表不同时代正向、斜向碰撞带分界线

GLG—Gaoligong ductile shear zone; BC—Biluoxueshan-Chongshan ductile shear zone; XLS-DCS-ALS—Xuelongshan-Diancangshan -Ailaoshan ductile shear zone; The red, green, and orange circles are the positions of the Eastern Himalayan Synntax in different periods, relative to the current Eurasia;  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $L_3$  are the boundaries between the orthogonal and oblique collisional belts in different periods

近平行的逆冲断层-褶皱构造组合,从中新世开始叠加与造山带走向近垂直的伸展构造带(Yin and Harrison, 2000);而斜向碰撞带内早期发育一系列与造山带近平行的走滑构造,如实皆断裂带、高黎贡剪切带、崇山-碧罗雪山剪切带、红河-哀牢山剪切带等(Leloup *et al.*, 1995; Wang and Burchfiel, 1997; Cao *et al.*, 2011; Zhang *et al.*, 2012a, 2012b, 2014; 史鹏亮等, 2015),中新世以后普遍发育近东西向挤压构造变形(沙绍礼等, 2001; Schoenbohm *et al.*, 2005; Yang *et al.*, 2014a; Liao *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2020)。

构造是控制沉积盆地形成演化的主要因素(Ingersoll and Busby, 1995; McCann and Saintot, 2003; 闫臻等, 2008, 2018)。与褶皱-冲断构造变形样式相对应,在正向碰撞带内发育大量前陆盆地,如可可西里盆地、玉树-囊谦盆地、贡觉-芒康盆地、伦坡拉盆地等,盆地中或多或少发育古新世-始新世火山岩(图1)(Yin *et al.*, 1999; Yin and Harrison, 2000; Spurlin *et al.*, 2005; 张克信等, 2007, 2013; Yin *et al.*, 2008; Yin, 2010; 吴珍汉等, 2011a, 2011b; 李亚林等, 2013; 吴驰华, 2014; Tang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018, 2019; 周江羽等, 2019)。对于这些盆地的属性、演化历史研究较多,而斜向碰撞带内新生代盆地的沉积学研究则比较薄弱(Yang *et al.*, 2014a; Gourbet *et al.*, 2017; Cao *et al.*, 2020)。

剑川盆地作为现今斜向碰撞带内最大的新生代沉积盆地得到了众多学者的关注。该盆地主体位于雪山山-点苍山-哀牢山剪切带中-北段的东侧(图1、图2)。早期研究者认为雪山山-点苍山-哀牢山剪切带活动起始于始新世晚期(Leloup *et al.*, 1995),剑川盆地内的充填物双河组、剑川组长期以来被认为形成于中新世、上新世<sup>①</sup>,这种时空关系认识使得人们将剑川盆地解释为走滑拉分盆地(Gourbet *et al.*, 2017; 覃琼等, 2019)。但近年来剑川盆地内火山岩同位素测年结果(马宏杰, 2013; Yang *et al.*, 2014a; Gourbet *et al.*, 2017; 吴旌, 2017; 沈青强等, 2017; 覃琼等, 2018, 2019; 韩雪等, 2019)表明,剑川盆地形成于始新世中晚期(35 Ma)以前,而大量热年代学数据表明,其西侧剪切带的活动时代在27~20 Ma之间(Searle, 2006; Liu *et al.*, 2020)。

另外,构造变形分析结果(Yang *et al.*, 2014a; Liao *et al.*, 2020; Cao *et al.*, 2020)表明,雪山山、点苍山之间的地质体缺乏走滑变形的明显证据。综合这些研究进展,认为剑川盆地可能不是由雪山山-点苍山-哀牢山大型走滑作用形成的拉分盆地。

盆地充填物的时空变化特点可为盆地构造属性分析提供最直接证据(Dickinson, 1974, 1976; Bal-lance and Reading, 1980; Reading, 1982; McCann and Saintot, 2003; 闫臻等, 2008, 2018)。本文在系统分析剑川盆地西部边缘地区填充物时空变化特征基础上,结合区域资料,探讨了剑川盆地的构造属性,欲为区域构造演化提供沉积学约束。

## 1 区域背景

自印度-欧亚大陆开始碰撞以来,正向碰撞带遭受了持续的近南北向挤压及地壳缩短,形成了一系列近东西走向的褶皱-逆断层系及对应的前陆盆地(吴珍汉等, 2006, 2011a, 2011b; Yin and Harrison, 2000; 张克信等, 2013; 周江羽等, 2019)。在渐新世晚期(约30~23.5 Ma),高原腹地发生区域性隆升和剥蚀夷平,缺失沉积纪录(Wang *et al.*, 2002)。从中新世开始,高原腹地形成规模巨大的古大湖,广泛发育的湖相沉积角度不整合覆盖于前中新世地层之上的湖相沉积,这些沉积地层产状至今依然表现为近水平状态(吴珍汉等, 2006),表明从中新世开始,高原腹地的大规模地壳缩短基本结束,地壳缩短作用主要发生在高原北缘、北东缘(Lu *et al.*, 2018)。岩浆岩年代学、地球化学数据表明,晚更新世—早中新世期间存在岩浆作用的重大转换(Guo and Wilson, 2019)。

目前为止,斜向碰撞带内具有确切年代学证据的始新世盆地主要发育于剑川盆地-丽江盆地一线以北地区(图1; 朱志军等, 2011; Yang *et al.*, 2014a; 梁明娟, 2016; 沈青强等, 2017; Gourbet *et al.*, 2017)。构造变形及同位素测年数据表明,从中新世开始(Searle, 2006; Cao *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2020)剑川盆地以南(含剑川盆地)的斜向碰撞带地壳发生了明显的近东西向挤压缩短,形成一系列褶皱-逆断裂(Liao *et al.*, 2020)和零星分布的晚新生代沉积盆地,如发育于哀牢山褶皱-逆冲带两侧

① 云南省地矿局. 1974. 兰坪地区地质图(1:20万)。



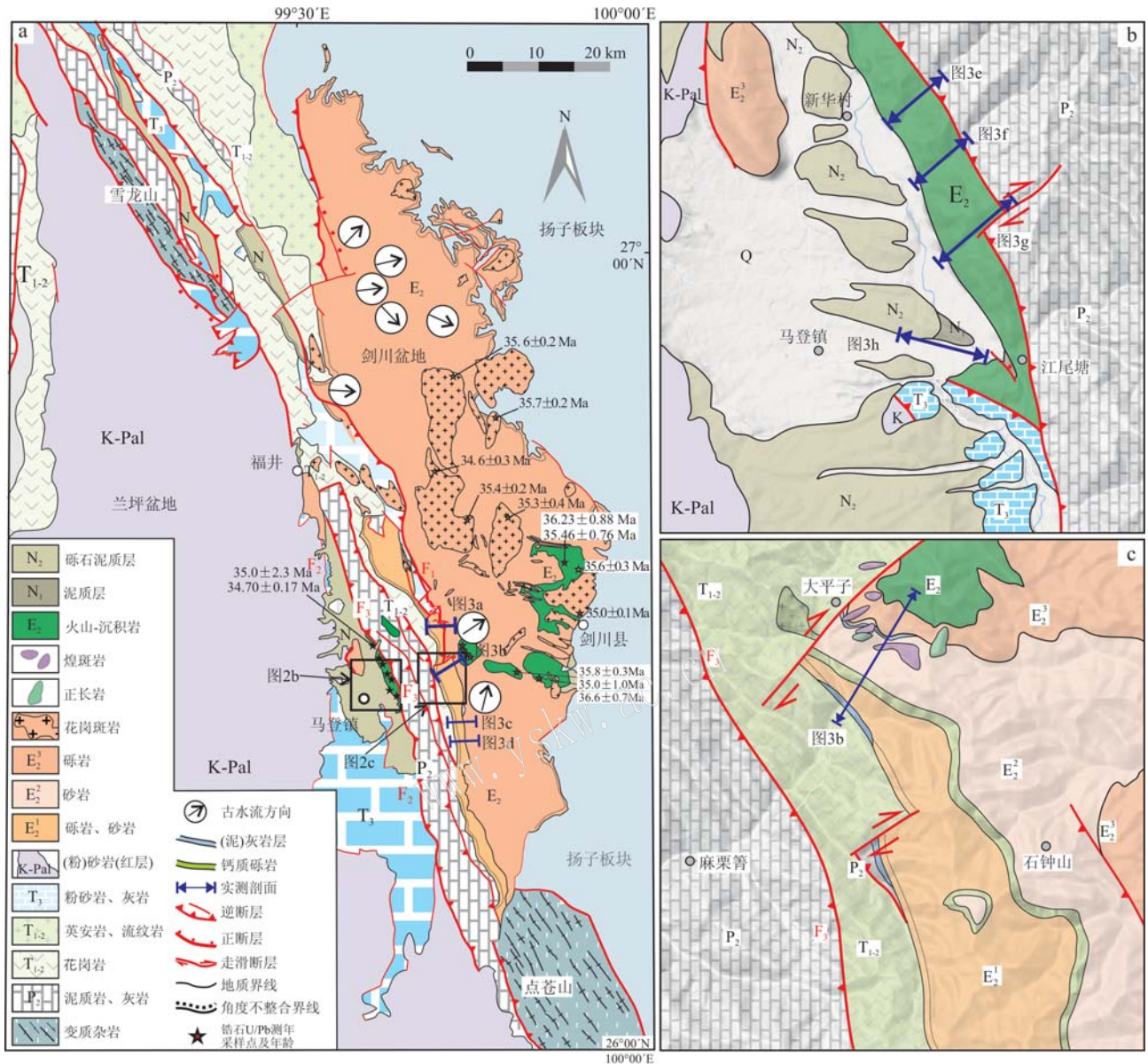


图2 剑川盆地及周缘地区地质图(示实测剖面位置)[a, 据云南省地矿局(1974<sup>①</sup>, 1984<sup>②</sup>), Yang等(2014a)、Liao等(2020)修改]、马登地区地质图及火山岩实测剖面位置(b)和大平子地区地质图及剖面位置(c)

Fig. 2 Geological map of the Jianchuan basin and its adjacent regions, also showing the locations of profiles for sedimentary study (a, modified after Bureau of Geology and Mineral Resources of Yunnan Province, 1974<sup>①</sup>, 1984<sup>②</sup>; Yang *et al.*, 2014a; Liao *et al.*, 2020), geological map of the Madeng area and the locations of profiles for volcanic strata (b) and geological map of Dapingzi area and the location of profile (c)

含石膏的中新世前陆盆地 (Schoenbohm *et al.*, 2005)。而剑川-丽江盆地以北的藏东地区(东构造结以东),中新世盆地属性、变形特点与高原腹地高度可比(Horton *et al.*, 2002)。由此可见,从新生代沉积盆地的时空分布特点看,正向碰撞带与斜向碰撞带之间可能存在3条不同时代的界线(图1):界

线L<sub>1</sub>位于剑川盆地以南,为始新世盆地发育区的南界;界线L<sub>2</sub>位于剑川盆地以北,与龙门山断裂带走向一致,代表了正向碰撞带与斜向碰撞带中不同属性的中新世盆地分界线;界线L<sub>3</sub>位于喜马拉雅东构造结附近,代表了正向碰撞带与斜向碰撞带的现代分界线。鉴于印度地块持续向北迁移,斜向碰撞带

① 云南省地矿局. 1974. 兰坪地区地质图(1:20万).

② 云南省地矿局. 1984. 永平地区地质图(1:20万).



随之向北生长,这3条界线有可能是不同时代斜向碰撞带与正向碰撞带的分界线。合理确定位于两条界线之间剑川盆地的构造属性有助于深化对印度-欧亚大陆碰撞过程的理解。

剑川盆地东西宽约40 km,南北长约100 km。东部边界保留完整,为覆盖于扬子地块古生界之上的不整合面<sup>①②</sup>。西部边界的北部多被NNW向逆断裂破坏(Yang *et al.*, 2014a),盆地界线出露并不连续,自中部向南,盆地西边界断续出露,充填物角度不整合于下中三叠统火山岩(梁明娟等, 2015; 唐靛等, 2016; Xin *et al.*, 2018)之上(图2a)。新近的野外调查还表明,在剑川盆地、马登盆地之间的盆地基底岩石裸露区(老君山西麓),同期钾质、超钾质火山岩及其相关沉积岩也有零星出露,直接覆盖于这些下中三叠统火山岩之上。

盆地东缘充填物角度不整合覆盖于基底之上,基底、盖层变形弱,而盆地西缘基底发育逆冲断层,盆地北部充填物古水流流向东、南东、北东向,南部充填物古水流流向北东、东向(图2a; Wei *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2020),表明盆地西缘断裂可能控制了盆地的形成过程,更适合用于研究盆地属性。本文选取了盆地西界的南段为研究对象,从北往南进行了白岩子、大平子、石钟山东和羊望塘剖面测制,另对新华村上河箐、南头箐、江尾塘上塔曲和江尾塘剖面的火山岩进行了测制(图2b),以查明火山岩序列,最终为剑川盆地构造属性提供依据。

## 2 剑川盆地充填序列

### 2.1 白岩子剖面

该剖面位于所研究剖面中的最北端,未见底,结合前人研究资料(Yang *et al.*, 2014a),自下而上可以划分为3个岩性段(图3a)。下岩性段厚度约为380 m,主要岩性为紫红色细粒泥质粉砂岩夹泥岩,这种水动力条件较弱的沉积环境可能属于扇三角洲平原亚相。中岩性段厚度为约15 m,主要由粗面质玄武岩、粗面质英安岩构成,锆石U-Pb年龄为36.59±0.67 Ma(Yang *et al.*, 2014a)。上岩性段为一套冲积扇相粗碎屑岩组合。由底至顶,上岩性段又可以细分为两个亚段:下亚段以厚1300 m灰紫色泥质粉

砂岩、紫红色粉砂岩、紫红色粗砂岩夹砾岩透镜体为主,粉砂岩、粗砂岩中发育水平层理、槽状交错层理,砾岩透镜体中砾石分选性差,局部具有叠瓦状构造,底面发育冲刷面,表现出冲积扇的扇中亚相特点;上亚段厚度为800 m的粗碎屑岩,主要为紫红色巨厚层巨砾岩夹厚层砂岩,砾石磨圆度好,分选性差,砾径在0.5~100 cm间,一般为10~20 cm,底部发育冲刷面,表现出冲积扇的扇根亚相的特点。砾石主要来自下伏的下中三叠统,包括砂岩、灰岩、火山岩、花岗岩和页岩。

### 2.2 大平子剖面

大平子地区地层出露较为完整,总厚度达1600 m(图3b)。根据岩性组合特征,该剖面可分为3个岩性段。

(1) 下部岩性段厚度约为240 m,由底至顶可以分为3个亚段。第1亚段厚度约为14 m,主体为灰色中薄层状泥质灰岩,单层厚度3~10 cm,角度不整合覆盖于下中三叠统火山岩之上(图4a)。第2亚段总厚度为60.23 m,由红色砾岩、含砾粗砂岩、砂岩共同构成,呈现出至少4个由下部砾岩和上部砂岩组成的韵律层(图4b)。砾岩中厚层状,基质(砂)支撑,局部颗粒支撑。单层砾岩厚度为0.5~1.5 m,发育不规则侵蚀基底。砾石次圆-圆状,砾径相差悬殊(3~30 cm),主要为紫红色英安岩。砂岩呈厚层状,发育平行层理。第3亚段厚度约为170 m,表现为由砾岩、砂岩、泥岩构成的3个向上粒度变细的韵律层。单个韵律层厚度为3~5 m。砾岩表现为颗粒支撑和基质支撑两种,砾石成分为紫红色、灰绿色粉砂岩、泥岩、灰岩,次棱角状-棱角状。不同韵律层的砾岩砾径有向上增大趋势,底部韵律层中的砾岩砾径仅0.5~1 cm,向上增大至1~5 cm,局部可达12 cm。细砂岩为紫红色中厚层状,通常含有泥岩夹层,含有植物化石,并见球枕构造和钙质结核,钙质结核发育频度向上增高,单个钙质结核粒径5~10 cm,呈不规则的“姜状”(图4c),可能代表了古土壤之下的淋滤层。该亚段顶部出露一套厚约50 m的钙质胶结砾岩,主要为生物碎屑灰岩以及少量石英砾(脉石英),砾径1~3 cm,磨圆差(图4d)。偶夹其他砾岩透镜体(厚约1.5 m),由灰色细砂岩砾石组成,砾径10~20 cm,呈浑圆状。值得注意的是,这层灰岩砾岩

① 云南省地矿局. 1974. 兰坪地区地质图(1:20万).

② 云南省地矿局. 1984. 永平地区地质图(1:20万).

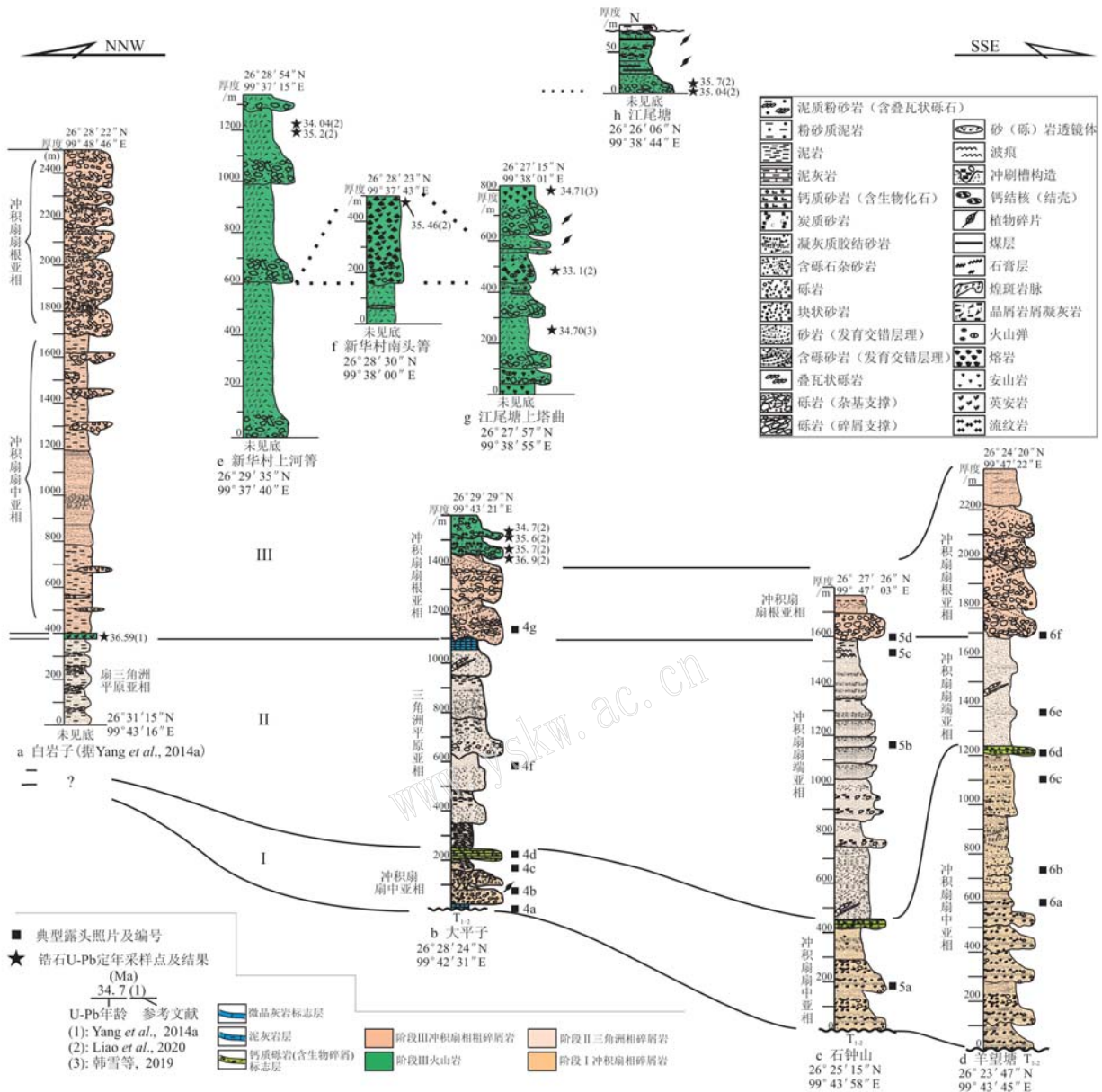


图3 剑川盆地西缘地层柱状图

Fig. 3 Measured sedimentary columnar section of the western margin of the Jianchuan basin

往南断续出露,形成一个很好的标志层,但往南粒度变细,逐渐变成砂屑灰岩(图2c)。

该段总体表现为粗细频繁交替、向上变粗的多个韵律层,各个韵律层底部发育明显的冲刷面,韵律层顶部频繁暴露,这些特点表明该段沉积具有典型冲积扇中相特点。

(2) 中岩性段厚度约为900 m,由底至顶可分为3个亚段。第1亚段厚度约为100 m,为灰黑色薄层状炭质、泥质粉砂岩,发育压实劈理。第2亚段厚约750 m,由中砂岩、细砂岩构成若干个向上粒度变细

的韵律层。单个韵律厚3~10 m,底部为浅灰色中厚层状中砂岩,局部发育砾岩透镜体,向上过渡到细砂岩、泥质粉-细砂岩,粉-细砂岩中可见水平层理(图4e)。第3亚段厚约50 m,为棕灰色、黑色厚层状泥灰岩与泥岩互层,含介形虫、双壳类动物化石。总体而言,该岩性段主要以中砂岩为主,含少量砾岩,结合其中地层的韵律变化以及层理构造,推测该段为三角洲平原亚相,其中的小型砾岩透镜体代表了一些水下河道相;顶部水体加深,泥灰岩的出现可能代表了滨湖亚相环境。



(3) 上岩性段砾石含量明显增加,砾径变大,可分为2个亚段。下亚段由巨厚的紫红色厚层-块状砾岩和紫红色砂岩组成。砾岩层与砂岩构成粒径向上变细的正韵律,韵律层底部发育冲刷面构造。颗粒支撑,砾石以紫红色和灰白色细-中砂岩为主,少量安山质熔岩,磨圆好,分选差,砾石砾径为3~10 cm,具叠瓦状构造(图4f)。紫红色砂岩一般为厚

层,单层厚度为1~1.5 m,发育斜层理。上亚段由火山岩组成,岩性有英安质、流纹质火山集块岩、凝灰岩,火山角砾大小为3~10 cm,局部可达20 cm,直接覆盖于下亚段砂砾岩之上,火山岩段出露厚度近千米,未见顶。根据该岩性段出露分选性差且具叠瓦状构造的砾岩,向发育斜层理砂岩过渡的特点,推测该段为冲积扇扇根亚相。



图4 大平子剖面沉积物典型露头照片

Fig. 4 Typical field photographs of the Dapingzi profile

a—灰黑色薄层泥灰岩,角度不整合覆盖在下中三叠统火山岩之上; b—砾岩,砂岩组成向上变细韵律,代表了冲积扇扇中亚相沉积,砾岩底部发育不规则的冲刷-充填构造; c—细砂岩、泥质粉砂岩互层,发育钙质结核以及大型板状斜层理构造; d—钙质胶结砾岩,富含生物碎屑; e—中砂岩、粉细砂岩构成向上变细韵律,发育水平层理,代表三角洲平原亚相沉积; f—冲积扇扇根亚相沉积砾岩,砾石呈浑圆状  
a—grayish-to-blackish laminated marlstone unconformably overlying the Early to Middle Triassic volcanic rocks; b—middle fan facies deposits consisting of fining-upward rhythmic sequences of conglomerate in the low part and sandstone in the upper part; c—middle fan facies deposits made of intercalating purple-red siltstones and sandstone where cross-bedded and calcareous nodules are well developed; d—conglomerate of bioclasts; e—fan delta plain facies sediments, consisting predominantly of sandstone with large-scale planar cross beds; f—upper fan facies conglomerates consisting of clast-supported and poorly organized pebbly

### 2.3 石钟山剖面

石钟山剖面位于大平子剖面南南东约6 km处,出露新生代地层总厚度约1 800 m(图3c)。根据岩性组合特征,该剖面可分为3个岩性段。

(1) 下部岩性段厚约450 m,由底至顶可以分为两个亚段。第1亚段厚约280 m,为紫红色厚层状砾岩、薄层状粉砂岩,角度不整合覆盖下中三叠统火山岩之上。砾石成分复杂,有泥岩、脉石英以及火山岩砾石,砾径2~5 cm。第2亚段厚约170 m,底部为紫红色细砂岩、泥质粉砂岩,含灰绿色粉砂岩团斑和钙质结核,偶夹含砾细砂岩薄层(图5a)。顶部出露厚

30~50 m灰色钙质胶结的砂、砾岩,砾石成分以生物碎屑灰岩为主,有少量紫红色粉砂岩以及脉石英,砾径0.5~1.5 cm。该岩性段垂向上具有粗细频繁交替的韵律层,砾岩中层理不明显,分选性差,粉-细砂岩中有钙质结核等,表明该段沉积于冲积扇扇中亚相环境。

(2) 中部岩性段厚约1 050 m,由底至顶可以分为4个亚段。第1亚段为厚270 m砖红色中-厚层状细砂岩,发育水平层理、斜层理。第2亚段厚260 m,由紫红色厚层状砾岩、含砾砂岩向上过渡到紫红色砂岩的韵律组成,韵律中砾岩、含砾砂岩层厚3~8



m 不等,砾石成分复杂,由英安岩、砂岩、粉砂岩、千枚岩以及少量花岗岩、流纹岩和脉石英构成,砾石呈次棱角-次圆状,砾径 2~30 cm,砾石长轴与短轴之比在 2~4 之间,局部可见砾石排列成叠瓦状构造;砂岩发育斜层理构造。第 3 亚段厚约 210 m,由粉砂岩、泥岩组成,局部发育向上粒度变粗的韵律,由紫红色中层状粉砂质泥岩向上过渡为紫红色粉-细砂岩,单个韵律层厚 5~15 m。向上泥岩层明显增厚、增多(图 5b)。第 4 亚段厚约 310 m,为砖红色中-厚层状泥质粉砂岩,偶夹细砂岩,泥质粉砂岩层面见虫迹,发育波痕构造(图 5c)。该岩性段由粉砂岩、砂岩以及含砾砂岩组成,整体表现出冲积扇扇端亚相

特点,中、下部出露的砾岩层、砾岩透镜体代表了冲积扇上的水下河道,中、上部分出现的自下而上由细变粗韵律代表了进积型的反旋回沉积层序,说明当时沉积物的堆积速率大于盆地的沉降速率,冲积扇砂体短暂地向盆地方向推进。

(3) 上段由紫红色中厚层状砾岩、泥质粉砂岩、砂岩组成,出露厚度 180 m,未见顶。砾岩层底面发育冲刷-充填构造(图 5d),砾石成分有灰岩、泥岩、砂岩以及脉石英,次棱角-次圆状,砾径相差悬殊(0.5~10 cm),长、短轴之比变化于 1~2 之间,颗粒-基质支撑,发育叠瓦状构造,泥质粉砂岩、砂岩夹层可见斜层理。该段出露厚度较薄,推测为冲积扇扇根亚相。

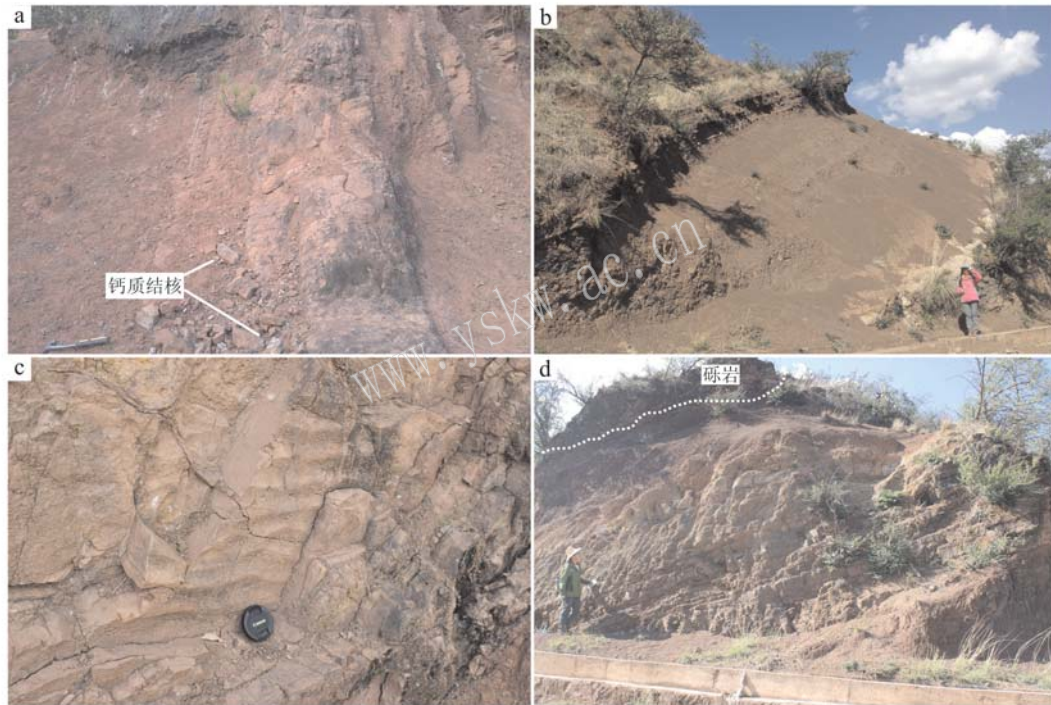


图 5 石钟山剖面典型露头照片

Fig. 5 Typical field photographs of the Shizhongshan profile

a—砖红色泥质粉砂岩,发育灰绿色斑块,偶见钙质结核; b—泥质粉砂岩层厚向上增大,代表水体相对稳定的扇三角洲平原亚相环境; c—泥质粉砂岩中的波痕; d—下部细砂岩、粉砂岩构成向上变细韵律,代表扇三角洲平原亚相环境,上部出露冲积扇相砾岩,砾岩底面发育冲刷-充填构造

a—brick red muddy siltstone where a few gray-green carbonate-cemented nodules are developed; b—an upward thickening muddy siltstone succession representing a fan delta plain facies; c—muddy siltstones with ripples; d—a fan delta plain succession consisting of upward-fining clastics was overlain by the fan facies conglomerates, between them is a filled scour

#### 2.4 羊望塘剖面

羊望塘剖面位于石钟山剖面南约 4 km 处,地层由整合接触的 3 段构成,总厚度约 2 400 m(图 3d)。

(1) 下部岩性段厚约 1 250 m,根据沉积物颜

色、粒度由底到顶可以细分为 3 个亚段。下亚段厚 650 m,由多个向上变细的韵律层组成,角度不整合于下中三叠统火山岩之上。韵律层底部为紫红色厚层状含砾细-中砂岩,向上过渡为紫红色中厚层状泥岩,偶夹单层厚 2~10 m 不等的砾岩层。这些砾岩砾

石成分复杂,有紫红色英安岩、紫红色泥岩、花岗岩以及脉石英,磨圆性差,砾径 1~15 cm,砾岩层底面常发育冲刷-充填构造。向上砾石中火山岩含量减少,逐渐过渡为以紫红色粉、细砂岩砾为主的砾岩,砾层含砾降低且长轴方向定向排列,构成一系列低角度的大型板状斜层理(图 6a)。中亚段厚约 300 m,主要由紫红色泥质粉砂岩、粉砂岩组成,夹紫红色薄层状泥岩,发育纹层构造、球枕构造。多夹灰绿色-灰白色细-中砂岩透镜体、灰绿色泥岩(图 6b)。砂岩透镜体底面发育冲刷-充填构造。灰绿色泥岩中可见斜层理、泥裂构造,局部地区夹有薄层砾岩,砾岩层底面发育冲刷-充填构造,并具有向上变细的韵律(图 6c)。上亚段厚度约 240 m,为紫红色细-中砂岩、粉砂岩,向上粒度变细,含灰绿色不规则砂质团斑以及球形风化,发育水平层理、槽状交错层理。顶部出露厚 30~50 m 浅灰色厚层-块状钙质胶结砾岩,砾石以生物碎屑灰岩、细砂岩为主,含少量石英砾,砾径 0.5~2 cm(图 6d)。该岩性段垂向上表现出粗细频繁交替的韵律层,砾岩中层理不明显,分选性

差,粉-细砂岩中的灰绿色砂质团斑及球形风化,表明该段沉积具有冲积扇扇中亚相的特点。

(2) 中部岩性段厚 450 m,主要为紫红色-砖红色厚层块状细砂岩,偶见大型板状斜层理(图 6e)。该段岩性水动力条件减弱,可能代表了冲积扇扇端亚相或三角洲平原亚相环境。

(3) 上部岩性段出露厚 700 m,为砾岩、细砂岩组合。分为两段,底部以紫红色厚层-块状砾岩夹紫红色细砂岩层或砂岩透镜体为主,层厚 550 m,发育多个向上粒度变细的韵律。砾岩层底面多发育冲刷-充填构造,砾石成分为泥岩、英安岩、细砂岩,砾石含量向上增多、砾径变大,砾径由下部 2~5 cm 向上逐渐变为 5~10 cm,大者可达 30 cm,分选性差,次圆-圆状,并逐渐变为颗粒支撑,砾石具有叠瓦状构造的特点。细砂岩夹层或透镜体中可见槽状交错层理、板状斜层理构造(图 6f)。顶部岩性段以紫红色细砂岩为主,厚约 150 m,发育水平纹层。这些以无层理块状特征为主的砾岩,底面通常发育冲刷-充填构造,可能代表了冲积扇扇根亚相。



图 6 羊望塘剖面典型露头照片

Fig. 6 Field photographs showing typical sedimentary structure of the Yanngwangtang profile

a—含砾粗砂岩,砾石定向排列,构成大型板状斜层理; b—紫红色细砂岩、泥岩中的灰白色砂岩透镜体,代表了扇三角洲平原上的河道沉积; c—灰绿色泥岩,沿层面发育泥裂,代表扇三角洲平原亚相沉积; d—钙质砂屑砾岩,富含生物碎片、灰岩砾; e—细砂岩中发育的斜层理,指示古水流向东; f—砾岩与细砂岩接触部位发育冲刷-充填构造,细砂岩斜层理指示古水流向东

a—elongate conglomerates floating within coarse-grained sandstone preferred orientated to form large-scale tabular cross-beddings; b—a large lens-shaped grayish white sandstone body within purplish fine-grained sandstone and mudstone, suggesting a small channel on the alluvial floodplain; c—grayish green mudstone with mudcracks, suggesting a delta plain facies; d—conglomerate of bio-clastics; e—a cross-bedding in fine-grained sandstones indicating eastward paleocurrent direction; f—scour and fill structures developed along the boundaries between conglomerates and sandstones horizons, the cross-bedding in sandstones, indicating that an eastward paleocurrent direction



## 2.5 马登镇东侧火山岩剖面

马登镇新华村—江尾塘一带出露火山岩地层,虽然未见顶底,但火山岩厚度巨大,岩石类型较多,能较完整反映火山岩特点。通过4条剖面测得这些火山岩具有以下层序:

新华村上河箐地区出露的火山岩厚约1340 m,发育4个由底部火山角砾岩向顶部凝灰岩过渡的火山旋回,各个火山旋回厚度分别为604.6、388.8、286.7和57.2 m(图3e)。晶屑凝灰岩主要有灰紫色、灰白色、浅黄绿色调,呈中-厚层状,晶屑成分有角闪石、长石以及少量黑云母。各旋回底部火山角砾岩中角砾成分与这些晶屑凝灰岩一致,角砾呈棱角状,大小3~5 cm,局部大者达20 cm。

南头箐地区火山岩出露厚度约500 m,发育2个喷发旋回(图3f)。下部旋回厚158.8 m,主要为灰绿色厚层状凝灰岩,偶夹粉砂岩薄层。上部旋回厚340.3 m,为灰绿色块状英安质熔岩,可见钾长石、黑云母斑晶,发育安山质火山弹。

江尾塘北侧的上塔曲地区出露火山岩层总厚约820 m,岩性复杂,发育8个喷发旋回(图3g)。第1旋回为厚44.9 m灰绿色安山岩熔岩,未见底,安山岩中可见长石、角闪石以及黑云母斑晶,斑晶定向排列,显示流动构造。第2旋回厚61.8 m,底部为火山集块岩,集块成分为灰绿色英安岩、紫红色安山岩。向上变为紫红色安山岩熔岩,气孔较发育且多被绿泥石、绿帘石以及方解石充填。第3旋回厚199.3 m,底部为灰绿色火山集块岩,向上迅速变为晶屑凝灰质胶结的火山集块岩与晶屑凝灰岩互层,单层出露厚20 m,向上变为灰绿色晶屑凝灰岩。第4旋回厚131.6 m,底部为晶屑凝灰质胶结火山角砾岩,向上过渡为含火山角砾的晶屑凝灰岩,偶夹砾岩层,砾石成分有灰绿色粉砂岩、细砂岩,砾石大小3~5 cm,磨圆好。第5旋回厚约117.4 m,底部为灰色安山质熔岩,熔岩中含大量安山质火山弹,可见长石、角闪石斑晶。向上变为灰绿色晶屑凝灰岩,晶屑有长石、黑云母、角闪石和石英;凝灰岩中夹杂有植物化石、炭屑,并常含砾岩夹层,砾石有火山角砾岩、紫红色粉砂岩,磨圆好。第6旋回较薄,底部为厚5 m的火山角砾岩,向上过渡到10 m厚的灰绿色岩屑晶屑凝灰岩。第7旋回厚约55.8 m,底部为凝灰质胶结的

火山角砾岩,角砾成分有紫红色安山岩、砖红色凝灰岩以及火山弹,发育气孔构造。向上过渡到灰绿色岩屑晶屑凝灰岩,晶屑成分有长石、黑云母、角闪石以及石英、白云母,凝灰岩中可见植物碎片和炭屑。第8旋回厚约189.5 m,底部为火山角砾岩和集块岩,集块成分有灰绿色英安岩、紫红色安山岩,含植物碎片,上部为灰绿色块状安山岩熔岩。

江尾塘剖面火山岩层出露总厚约80 m。底部出露多个灰绿色厚层-块状砾岩向中厚层凝灰岩过渡的韵律(图3h),砾石成分有灰绿色流纹岩、英安岩以及灰黑色安山岩,砾径3~5 cm,大者可达15 cm,具一定磨圆,凝灰质胶结。上部为灰色厚层-块状细砂岩夹泥岩,含大量植物碎片以及煤层。

在马登盆地,这套火山岩明显被灰黑色含炭屑、煤层、石膏的泥质层和砖红色砾石层、泥质层角度不整合覆盖,这些泥质层、砾石层成岩性差且发育同沉积构造,普遍出露于“三江”造山带地区,被认为是中新世时期的沉积物(沙绍礼等,2001; Schoenbohm *et al.*, 2005)。

## 3 讨论

### 3.1 剑川-马登盆地充填物沉积特点

综合前人对马登盆地充填物研究结果,发现剑川盆地、马登盆地充填物东西距离最近处小于8 km,均发育始新统和中新统两套充填物(云南省地矿局,1974<sup>①</sup>,1984<sup>②</sup>;沙绍礼等,2001; Liao *et al.*, 2020),两盆地在充填物沉积序列、沉积相、地球化学特征及盆地属性上有很强关联。因此,本文结合剑川盆地西部边缘地区、马登盆地充填物时空变化特征以及区域资料,探讨了剑川盆地、马登盆地构造属性,为区域构造演化提供沉积学约束。

#### 3.1.1 沉积序列及分布

研究表明,两盆地主要充填物具有以下特点:

(1) 剑川盆地始新统可分为3个岩性段,底部为粗粒的冲积扇扇中亚相砾岩、砂岩,向上变为细粒的三角洲平原亚相砂岩,顶部发育一套粗粒的冲积扇扇根亚相的砾岩、砂岩,砾岩之上出露一套多旋回的火山岩(图3)。盆地中新统主要为含砾砂岩、砂岩、泥岩,具有成岩性差的特点(云南省地质调查院,

① 云南省地矿局. 1974. 兰坪地区地质图(1:20万).

② 云南省地矿局. 1984. 永平地区地质图(1:20万).



2008<sup>①</sup>; 沈青强等, 2017)。

(2) 马登盆地始新统主要为底部砾岩、砂岩, 上部为一套多旋回的火山岩。砾岩中砾石以灰岩砾为主, 呈棱角状, 分选性差, 砾岩层底部通常发育不规则的冲刷-充填构造, 具有冲积扇扇根亚相特点 (Liao *et al.*, 2020)。火山岩厚度上千米, 表现出多旋回喷发特点 (图 3e~3h)。中新统下部为一套灰黑色泥岩, 夹有泥灰岩、砂岩薄层, 零星分布于逆冲断层下盘; 上部为一套紫红色-黄白色砾石层、泥质层, 普遍发育同沉积正断层、液化砂脉、负载构造等软沉积变形构造。中新统具有成岩性差的特点 (沙绍礼等, 2001; Liao *et al.*, 2020)。

(3) 马登地区始新统充填物与剑川盆地始新统顶部序列一致, 表明该时期两盆地东西贯通。剑川盆地西缘的大平子、白岩子地区顶部扇根亚相砾岩、砂岩序列中夹有火山岩层。这些火山岩与东部剑川石菜江地区、西部马登新华-江尾塘地区的火山岩构成一条 NEE-SWW 走向的火山岩带 (Liao *et al.*, 2020)。

### 3.1.2 充填过程

通过详细的沉积学观察, 可以大致刻画始新世剑川盆地充填过程。盆地西缘充填物沉积序列表明该区沉积相变化巨大, 若能确定若干沉积等时面, 将十分有利于详细梳理沉积相时空变化规律。区域地质填图表明, 剑川盆地西缘地层角度不整合覆盖在下中三叠统火山岩之上 (图 3), 虽然不同位置沉积开始时间不同, 但差别不会太大, 可以将这一不整合界面大致视为一个等时面 (等时面 a) (图 7a)。

沉积物源区的突变往往反映一次重大构造变形事件, 具有特定区域范围内的等时性。剑川盆地西缘底部沉积物几乎全部源自作为盆地西部基底的下中三叠统火山岩, 表明剑川盆地开始沉积时地表出露下中三叠统火山岩。在各剖面中段普遍出现一层由生物碎屑灰岩组成的砾岩, 尤其以大平子、羊望塘剖面生物屑灰岩砾岩含量最高 (图 3)。该砾岩层连续出露, 成为野外特征明显的标志层 (图 2c), 其连续出现代表了沉积物源的一次突变。填图结果表明, 下中三叠统火山岩覆盖在上二叠统砂岩、泥岩、灰岩组合之上 (原上兰组) (唐靛等, 2016; Xin *et al.*, 2018); 剑川盆地沉积序列中出现连续的生物碎屑灰岩角砾层, 表明此时火山岩层之下的灰岩开

始暴露于地表, 并为盆地提供沉积物。填图结果还发现, 上二叠统与下中三叠统之间为倾向西的逆断层 (图 2a 中的  $F_3$ ), 因此推测沉积物源的变化由构造变形引发, 正是这次逆冲变形导致灰岩暴露于地表。这套灰岩角砾岩之上的砾岩中, 灰岩角砾较为常见, 可将这层砾岩视为另一个等时面 (等时面 b) (图 7b)。

剑川盆地内的火山岩形成于一个在测试误差范围内近同时的短暂时限内 (马宏杰, 2013; Yang *et al.*, 2014a; Gourbet *et al.*, 2017; Liao *et al.*, 2020), 其底面是一个等时面。但这套火山岩分布局限, 无法直接限定整个盆地所有位置的相关沉积时限。两个剖面观察结果显示, 这套火山岩均出现在各剖面由最细沉积物组成的地层 (凝缩段) 之上, 如大平子剖面中的泥灰岩 (图 3b), 老剑-兰公路沿线的泥岩、粉砂岩 (图 3a) 均为相关剖面出现的最细粒岩石。在大平子地区, 火山岩之下、泥灰岩之上夹一层约 300 m 厚的巨砾岩, 是快速堆积的产物。鉴于此, 可将凝缩段顶面视为剑川盆地充填物的第 3 个等时面 (等时面 c) (图 7c), 该等时面也是一个沉积相的突变界面, 其上沉积岩粒度向上急剧变粗。

上述 3 个等时面将剑川盆地充填过程划分为 3 个阶段 (图 7), 它们的沉积序列、沉积厚度及沉积相的空间变化反映了盆地时空演化历史 (图 3、图 7)。

阶段 I 夹于等时面 a 和等时面 b 之间, 发育冲积扇相, 沉积层具有明显北薄南厚的特点, 砾岩层出现频率向北降低。南部总体为扇根-扇中亚相, 往北渐变为扇中亚相的砾岩-砂岩韵律层, 最北部剖面未出露。这些特点表明冲积扇扇根位于南南东一侧, 扇端方向位于北北西一侧, 沉积物多源自西南侧的下中三叠统火山岩, 顶部突然出现灰岩角砾的加入 (图 7c)。

阶段 II 夹于等时面 b 和等时面 c 之间, 基本是阶段 I 的连续发展, 具有扇三角洲平原亚相或冲积扇扇端亚相特点, 发育中砂岩-细砂岩向上粒度变细的韵律层, 顶部发育粉砂岩、泥岩、泥灰岩, 代表盆地达到了最大规模 (图 7b)。

等时面 c 之上为阶段 III 沉积, 具有冲积扇扇中亚相-扇根亚相的特点, 发育巨砾岩、粗砂岩。与阶段 I、II 不同之处在于, 阶段 III 沉积北侧厚度明显大于南侧, 北侧为扇根亚相, 南侧为扇中亚相, 表

① 云南省地质调查院. 2008. 中华人民共和国 1:25 万福贡丽江幅区域地质调查报告.

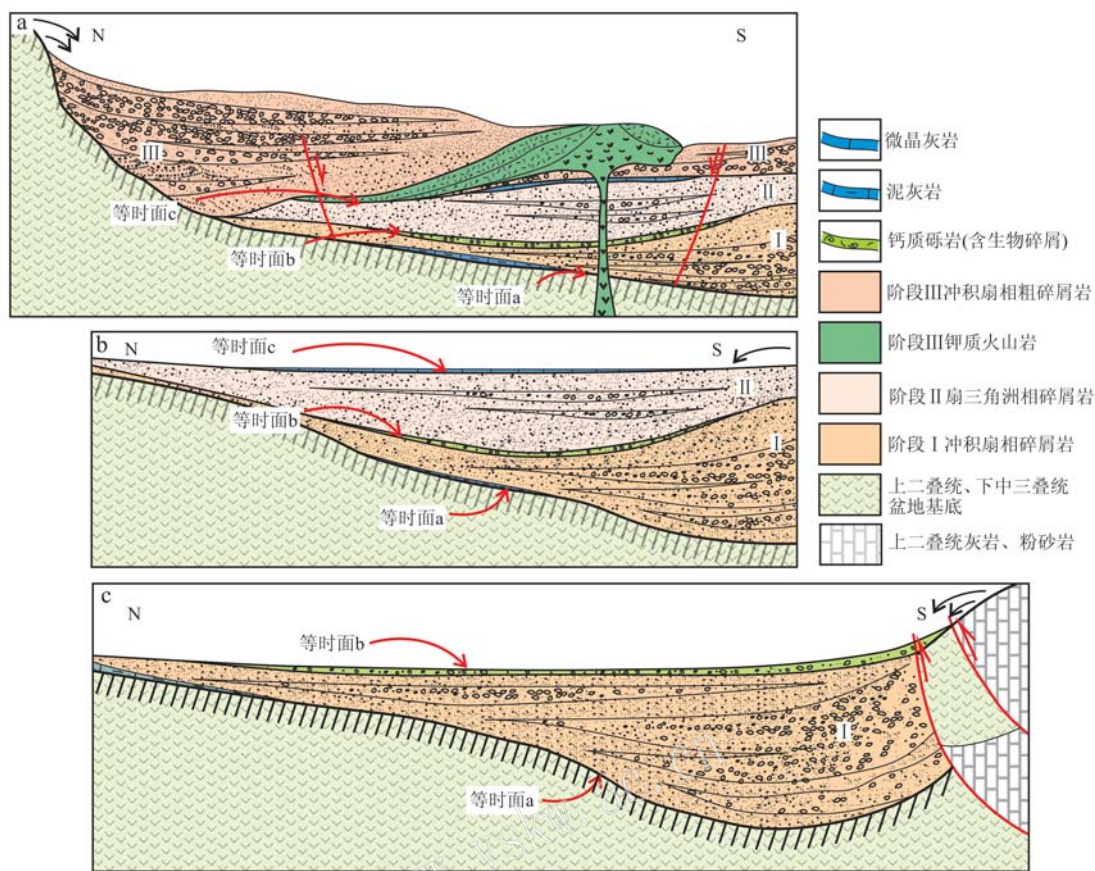


图7 剑川盆地西缘充填过程示意图

Fig. 7 Schematic model showing the basin-filling processes on the western margin of the Jianchuan basin

明沉积物主要源自北北西侧(图7a)。

阶段Ⅲ发育的火山岩具有钾质、超钾质特点,这种火山岩被认为具有幔源成因,代表岩石圈伸展的构造背景(Chung *et al.*, 1998, 2005; Lu *et al.*, 2012),这与阶段Ⅰ、Ⅱ沉积中心迁移到中部地区以及沉积物源方向发生的早期源自西南方、晚期源自西北方转变相互暗合。更重要的是,阶段Ⅲ砾岩、火山岩向西延伸到马登地区,向东延伸到剑川北部的石菜江地区,形成一条NEE-SWW走向的沉积、火山岩带,指示了NNW-SSE方向的伸展。

### 3.2 剑川-马登盆地属性及演化

综合剑川盆地、马登盆地充填物及充填过程,以两地同时出露的沉积岩、火山岩组合分界,将该区新生代盆地划分成3个演化阶段(图8):

(1) 印度欧亚大陆碰撞至37 Ma期间,受近W-E向挤压,剑川地区发育周缘前陆盆地(图8c)

前已述及,剑川盆地以西的江达-维西-云县弧岩浆岩带(Yang *et al.*, 2014b),形成了一条NNW-SSE走向、宽7~12 km的褶冲带,称“鲁甸-中和江褶

皱逆冲带”(Cao *et al.*, 2020)或“乔后逆冲带”(Gourbet *et al.*, 2017)。褶冲带东、西两侧边界分别为倾向西、东,总体走向NWN的逆断层,将二叠-三叠纪岩石逆冲到新生代沉积岩之上(图2中的 $F_1$ 和 $F_2$ )。有明确证据表明, $F_1$ 断层在剑川盆地沉积期间是活动的(Yang *et al.*, 2014a)。褶冲带内部还发育一系列NWN-SES走向的逆断层,其倾向多变,如其中的断层 $F_3$ 倾向南西,倾角约 $70^\circ \sim 80^\circ$ ,将西侧上二叠统砂岩、泥岩、灰岩组合向东逆冲到下中三叠统火山岩之上(唐靛等, 2016; Xin *et al.*, 2018; Cao *et al.*, 2020)。推测正是这类逆断层活动将原来被火山岩覆盖的灰岩推至地表,为剑川盆地提供了灰岩物质源,使得剑川盆地西缘沉积序列下段碎屑物以下中三叠统火山岩、沉积岩为主,中段以后才开始出现生物碎屑灰岩角砾。这一沉积岩物源序列正好与江达-维西-云县弧岩浆岩带的正常岩性序列(唐靛等, 2016; Xin *et al.*, 2018)相反。

另外,该时期的盆地充填物分布于褶冲带东侧逆冲断层下盘,走向与褶冲带平行(图2a)。前人发



现,充填物表现出靠近褶冲带一侧粒径更粗、厚度更厚,如剑川老君山、马坪关等地(云南省地矿局,1974)<sup>①</sup>,并且剑川盆地西缘都发育巨厚的砾岩、砂岩充填,向东到达盆地内部,充填物逐渐变细,厚度减薄,这些和古水流也表明盆地物源来自西部褶冲带(Wei *et al.*, 2016; Cao *et al.*, 2020)。再结合“幕式”盆地充填过程(闫臻等, 2018),可以认为 37 Ma 前,剑川盆地是在 NEE-SWW 向挤压作用下形成的周缘前陆盆地。在马登盆地内,未发现与剑川盆地阶段 I、II 充填物对应的沉积物,结合马登盆地、剑川盆地之间的晚二叠世-早三叠世火山岩直接被始新世沉积岩-火山岩覆盖的事实,本文认为,在 37 Ma 之前不存在马登盆地。

(2) 37~34 Ma 期间,受近 N-S 向伸展,形成剑川-马登裂隙盆地

剑川盆地阶段 III 充填物向西延伸到马登盆地地区,向东延伸到剑川北部的石菜江地区,形成一条 NEE-SWW 走向的沉积、火山岩带。两地区的火山岩具有钾质、超钾质特点,这种火山岩被认为形成于岩石圈伸展的构造背景(Chung *et al.*, 1998, 2005; Lu *et al.*, 2012)。而且,较阶段 I、II 而言,阶段 III 充填物粒度突然增粗,沉积相发生突变,表明该阶段构造活动强烈。因此,可以认为 37~34 Ma 火山岩活动时期,剑川-马登地区受 NNW-SSE 方向伸展,导致极粗粒的沉积物从南北两侧进入盆地,形成走向 NEE-SWW 的剑川-马登盆地(图 8b)。虽然后期山体隆起将这一盆地破坏,但残存在老君山西麓、剑川-马登之间褶冲带上的始新世沉积岩-火山岩,进一步证明了这一盆地的存在。

(3) 约 25 Ma 受近 W-E 向挤压,剑川-马登盆地被支解,在两地分别充填中新世周缘前陆盆地(图 8a)

马登盆地充填物及基底构造变形研究表明,中新统参与到变形之中,例如在玉龙石膏矿构造区中,马登西逆断层使上三叠统灰岩逆冲覆盖到中新统下段之上,马登镇南侧顺川井一带,亦可见上三叠统灰岩直接逆冲到中新统灰黑色泥岩之上,这种逆冲关系在马登盆地西侧的兰坪地区较为常见。中新统上部砾石层也多发育同沉积正断层、砂脉、负载构造等软沉积变形构造,表明其沉积过程中构造活动仍未停止。

结合前人研究成果,在维西地区、兰坪地区、剑川盆地、大理地区、楚雄地区以及哀牢山旁侧都普遍发育中新世地层(Schoenbohm *et al.*, 2005; Li *et al.*, 2014),它们以含石膏、煤层的泥岩、砾岩为主,成岩性差。这些地层受构造控制明显,多见于逆冲断层下盘,表明中新世的盆地充填亦具有前陆性质,可见向南“三江”造山带中,中新世时期,以龙门山断裂南西延长线为界,其南部、南东部发育周缘前陆盆地。

这样的盆地演化序列,清晰地展示了印度-欧亚大陆碰撞以来,剑川-马登地区的地壳经历了挤压-伸展-挤压两次构造转换,形成两期周缘前陆盆地,这样的盆地演化规律对重塑斜向碰撞带的生长过程有可能提供关键制约。

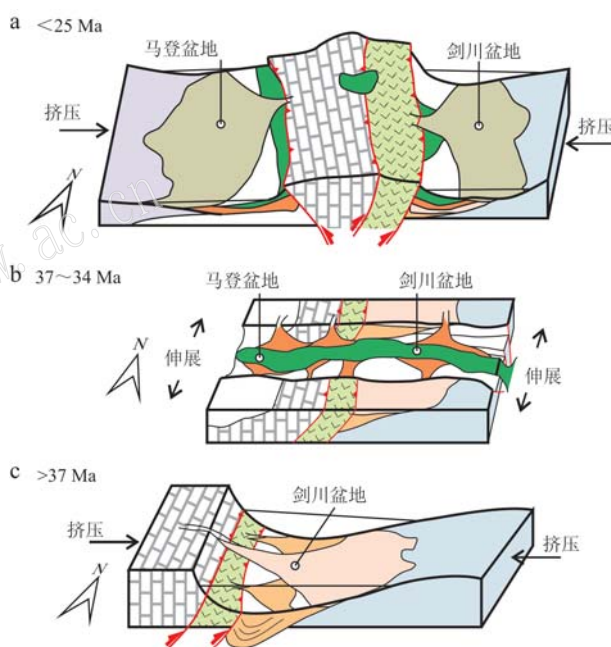


图 8 剑川-马登新生代盆地演化模式图

(图例参考图 2、图 7)

Fig. 8 Schematic geomorphic evolution of the Cenozoic Jianchuan and Madeng basins (legends as for Fig. 2 and Fig. 7)

### 3.3 大地构造意义

目前的剑川盆地位于斜向碰撞带内(图 1),以往认为该盆地为走滑拉分盆地(Gourbet *et al.*, 2017; 覃琼等, 2019)。本文研究及前人数据表明,剑川盆地为形成于始新世的前陆盆地,与同时代的贡觉-芒康盆地、玉树-囊谦盆地、可可西里盆地以及

① 云南省地矿局. 1974. 兰坪地区地质图(1:20 万).



伦坡拉盆地 (Yin *et al.*, 1999; Yin and Harrison, 2000; Spurlin *et al.*, 2005; 张克信等, 2007, 2013; Yin, 2010; 吴珍汉等, 2011a, 2011b; 李亚林等, 2013; 吴驰华, 2014; Tang *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018, 2019; 周江羽等, 2019) 等具有相同的构造属性, 都发育厚度不等的火山岩。这一特点暗示, 在始新世期间, 剑川地区可能与藏东及整个高原主体处于相同的构造部位, 即正向碰撞带内, 剑川盆地的南界很可能是始新世期间正向碰撞带与斜向碰撞带的界线。从目前已经发表的资料分析, 剑川盆地为整个“三江”造山带内最南侧的始新世盆地。

上述认识得到了地球物理数据的支持。大量地球物理探测结果 (Lev *et al.*, 2006; Sol *et al.*, 2007; Singh *et al.*, 2016) 揭示了“三江”造山带存在一条著名的岩石圈结构界线, 即北纬 26° 线 (图 1 中的  $L_1$ )。该界线两侧岩石圈结构完全不同。从地表地质资料看, 现已发现的始新世前陆盆地均位于界线以北, 其南侧未见始新世前陆盆地相关报道。地表地质资料与深部地球物理资料的高度吻合强烈暗示北纬 26° 线代表始新世期间正向碰撞带与斜向碰撞带间的分界线。最近发表的古地磁资料显示, 兰坪县城西侧的宝相寺组砾岩 (对应于剑川盆地地下段砾岩) 已经顺时针旋转了约 80° (杨向东等, 2020)。因而, 本文认为剑川盆地为形成于正向碰撞带内的前陆盆地, 形成之后其所在地块顺时针旋转了 80°。

前已述及, 发育不同构造属性中新世盆地的区域分界线大致位于龙门山断裂带的西延线上 (图 1 中的  $L_2$ ), 而现代斜向碰撞带与正向碰撞带的界线应该穿越东构造结 (图 1 中的  $L_3$ )。鉴于盆地属性与构造背景的高度关联性, 本文尝试将不同属性中新世盆地发育区的分界线视为中新世期间正向碰撞带与斜向碰撞带的界线。虽然还需要更深入的研究, 但上述 3 条界线位置的变化趋势很好地反映了斜向碰撞带向北逐渐生长的历史。

## 4 结论

(1) 剑川-马登新生代盆地具有 3 阶段沉积演化特点: >37 Ma 沉积记录于剑川盆地中, 为一套冲积扇中相砾岩、砂岩向扇三角洲平原亚相砂岩过渡的周缘前陆盆地沉积; 37~34 Ma 区域上以一套底部冲积扇根亚相砾岩、砂岩, 上部巨厚火山岩的充填物贯通剑川、马登地区, 形成走向 NEE-SWW 的

剑川-马登裂陷盆地; 约 25 Ma 统一的剑川-马登盆地发生彻底破坏, 在两地充填周缘前陆盆地沉积。

(2) 剑川盆地在 37 Ma 前的周缘前陆盆地与藏东、藏北地区同时代盆地属性一致, 在剑川-马登盆地以南不发育始新世前陆盆地。因而, 剑川-马登盆地南侧边界可能代表了始新世期间正向碰撞带与斜向碰撞带之间的分界线, 该分界线与地球物理探测揭示的岩石圈结构分界线重合。

(3) 约 25 Ma, 剑川-马登盆地被分割为两个独立盆地, 沉积学数据及构造变形特点表明, 研究区中新世盆地也属于周缘前陆盆地。区域资料分析显示, 中新世周缘前陆盆地的分布范围限于龙门山断裂带南西向延长线以南地区, 该线以北不发育中新世前陆盆地。该线可能代表中新世期间斜向碰撞带与正向碰撞带之间的分界线。

(4) 综合多学科数据, 认为在印度-欧亚大陆碰撞过程中, 斜向碰撞带逐渐向北生长。

**致谢** 感谢匿名评审人对稿件提出的宝贵意见。

## References

- Ballance P F and Reading H G. 1980. Sedimentation in oblique-slip mobile Zones [A]. Osney M. Special Publications of the International Association of Sedimentologists [C]. Oxford, 4: 229~236.
- Cao Kai, Leloup P H, Wang Guocan, *et al.* 2020. Thrusting, exhumation, and basin fill on the western margin of the South China block during the India-Asia collision [J]. Geological Society of America Bulletin, 133(1~2): 74~90.
- Cao Shuyun, Neubauer F, Liu Junlai, *et al.* 2011. Exhumation of the Diancang Shan metamorphic complex along the Ailao Shan-Red River belt, southwestern Yunnan, China: Evidence from  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  thermochronology [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 42(3): 525~550.
- Chung Sunlin, Chu Meifei, Zhang Yuquan, *et al.* 2005. Tibetan tectonic evolution inferred from spatial and temporal variations in post-collisional magmatism [J]. Earth-Science Reviews, 68(3~4): 173~196.
- Chung Sunlin, Lo Chinghua, Lee Tungyi, *et al.* 1998. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago [J]. Nature, 394(6 695): 769~773.
- Dickinson W R. 1974. Plate tectonics and sedimentation [A]. Dickinson W R. Tectonics and Sedimentation [C]. Tulsa, Oklahoma: Special

- Publication Society of Economic Paleontologists and Mineralogist, 22: 1~27.
- Dickinson W R. 1976. Plate tectonic evolution of sedimentary basins [A]. Tulsa, Oklahoma; American Association of Petroleum Geologists Continuing Education Course Notes[C]. Series 1: 1~62.
- Gourbet L, Leloup P H, Paquette J L, *et al.* 2017. Reappraisal of the Jianchuan Cenozoic basin stratigraphy and its implications on the SE Tibetan Plateau evolution[J]. *Tectonophysics*, 700~701: 162~179.
- Guo Zhengfu and Wilson M. 2019. Late Oligocene-early Miocene transformation of postcollisional magmatism in Tibet[J]. *Geology*, 47(8): 776~780.
- Han Xue, Yang Tiannan, Xin Di, *et al.* 2019. LA-ICP-MS Zircon U-Pb geochronology and its geological significance of two volcanic rocks from the Madeng Basin of the Sanjiang Orogenic Belt in Western Yunnan [J]. *Guizhou Geology*, 36(1): 69~76 (in Chinese with English abstract).
- Horton B K, Yin An, Spurlin M S, *et al.* 2002. Paleocene-Eocene syn-contractual sedimentation in narrow, lacustrine-dominated basins of east-central Tibet [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 114(7): 771~786.
- Ingersoll R V and Busby C J. 1995. *Tectonics of sedimentary basins* [A]. Busby C J and Ingersoll R V. *Tectonics of Sedimentary Basins* [C]. Oxford: Blackwell Science, 1~51.
- Leloup P H, Lacassin R, Tapponnier P, *et al.* 1995. The Ailao Shan-Red River shear zone (Yunnan, China), Tertiary transform boundary of Indochina[J]. *Tectonophysics*, 251(1~4): 3~10, 13~84.
- Lev E, Long M D and Van der Hilst R D. 2006. Seismic anisotropy in Eastern Tibet from shear wave splitting reveals changes in lithospheric deformation[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 251(3~4): 293~304.
- Li Shihu, Deng Chenglong, Paterson G A, *et al.* 2014. Tectonic and sedimentary evolution of the late Miocene-Pleistocene Dali Basin in the southeast margin of the Tibetan Plateau: Evidences from anisotropy of magnetic susceptibility and rock magnetic data[J]. *Tectonophysics*, 629: 362~377.
- Li Yalin, Zhu Lidong, Dai Jin, *et al.* 2013. Sedimentation and deformation of the Yanghu basin and its tectonic implications in the western Hoh Xil, Central Tibet[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 29(3): 1 017~1 026 (in Chinese with English abstract).
- Liang Mingjuan. 2016. Filling the Lanping Basin; Response to the Neotethyan Tectonics in the Sanjiang Orogenic belt [D]. Beijing: China University of Geosciences, 1~160 (in Chinese with English abstract).
- Liang Mingjuan, Yang Tiannan, Shi Pengliang, *et al.* 2015. U-Pb geochronology, Hf isotopes of zircons from the volcanic rocks along the eastern margin of Lanping basin, Sanjiang orogenic belt [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3 247~3 268 (in Chinese with English abstract).
- Liao Cheng, Yang Tiannan, Xue Chuandong, *et al.* 2020. Eocene basins on the SE Tibetan Plateau: Markers of minor offset along the Xuelongshan-Diancangshan-Ailaoshan structural system [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 94(4): 1 020~1 041.
- Liu Junlai, Chen Xiaoyu, Tang Yuan, *et al.* 2020. The Ailao Shan-Red River shear zone revisited: Timing and tectonic implications [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 132(5~6): 1 165~1 182.
- Lu Haijian, Tian Xiaobo, Yun Kun, *et al.* 2018. Convective removal of the Tibetan Plateau mantle lithosphere by ~26 Ma [J]. *Tectonophysics*, 731~732: 17~34.
- Lu Yongjun, Kerrich R, Cawood P A, *et al.* 2012. Zircon SHRIMP U-Pb geochronology of potassic felsic intrusions in western Yunnan, SW China: Constraints on the relationship of magmatism to the Jinsha suture [J]. *Gondwana Research*, 22(2): 737~747.
- Ma Hongjie. 2013. *Cenozoic Stratigraphy and Paleoenvironmental Evolution in the Hengduanshan Mountain Area of Southwest China* [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 1~183 (in Chinese with English abstract).
- Mattauer M, Matte P and Olivet J L. 1999. A 3D model of the India-Asia collision at plate scale [J]. *Geodynamics*, 328: 499~508.
- McCann T and Saintot A. 2003. Tracing tectonic deformation using the sedimentary record [J]. *Geological Society London Special Publications*, 208(1): 1~28.
- Molnar P and Tapponnier P. 1975. Cenozoic tectonics of Asia; Effects of a continental collision [J]. *Science*, 189(4 201): 419~426.
- Qin Qiong, Xu Yadong, Zhang Kexin, *et al.* 2018. Geological dating and paleoenvironmental research on volcanic events of the Jianchuan Formation in the Jianchuan Basin, Western Yunnan Province [J]. *Acta Geologica Sinica*, 92(10): 2 096~2 105 (in Chinese with English abstract).
- Qin Qiong, Xu Yadong, Zheng Guodong, *et al.* 2019. Rock characteristics and volcanic eruption-sedimentary periods of Jianchuan Formation in Jianchuan Basin, Western Yunnan [J]. *Geological Science and Technology Information*, 38(5): 165~173 (in Chinese with English abstract).
- Reading H G. 1982. Sedimentary basins and global tectonics [J]. *Proceedings of the Geologists Association*, 93(4): 321~350.
- Schoenbohm L M, Burchfiel B C, Chen Liangzhong, *et al.* 2005. Exhumation of the Ailao Shan shear zone recorded by Cenozoic sedimentary rocks,

- Yunnan Province, China[J]. *Tectonics*, 24(6): TC6015, 1~18.
- Searle M P. 2006. Role of the Red River Shear zone, Yunnan and Vietnam, in the continental extrusion of SE Asia[J]. *Journal of the Geological Society*, 163(6): 1 025~1 036.
- Sha Shaoli and Ao De'en. 2001. A study on the petrographic characteristics and eruption period of the Cenozoic volcanic rock in Dali-Jianchuan area[J]. *Yunnan Geology*, 20(4): 361~368(in Chinese with English abstract).
- Shen Qingqiang, Cao Kai, Wang Guocan, *et al.* 2017. Paleogene sedimentary and structural evolution of the Jianchuan-Lanping Basins, Western Yunnan and its regional tectonic implications[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 41(1): 23~41 (in Chinese with English abstract).
- Shi Pengliang, Yang Tiannan, Liang Mingjuan, *et al.* 2015. Temporal and spatial variation in the Cenozoic strain of the Sanjiang orogenic belt, SW China: A brief review and new observations[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 31(11): 3 331~3 352 (in Chinese with English abstract).
- Singh A, Eken T, Mohanty D D, *et al.* 2016. Significant seismic anisotropy beneath southern Tibet inferred from splitting of direct S-waves[J]. *Physics of Earth and Planet Interior*, 250: 1~11.
- Sol S, Meltzer A, Bürgmann R, *et al.* 2007. Geodynamics of the southeastern Tibetan Plateau from seismic anisotropy and geodesy[J]. *Geology*, 35(6): 563~566.
- Spurlin M S, Yin An, Horton B K, *et al.* 2005. Structural evolution of the Yushu-Nangqian region and its relationship to syncollisional igneous activity, east-central Tibet[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 117(9~10): 1 293~1 317.
- Tang Jing, Xue Chuandong, Yang Tiannan, *et al.* 2016. Late Permian to Early Triassic tectonostratigraphy of Madeng area, northwestern Yunnan, S. W. China: Volcanics zircon U-Pb dating[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 32(8): 2 535~2 554 (in Chinese with English abstract).
- Tang Maoyun, Liu Zengjing, Hoke G D, *et al.* 2017. Paleoelevation reconstruction of the Paleocene-Eocene Gonjo basin, SE-central Tibet[J]. *Tectonophysics*, 712~713: 170~181.
- Tong Xin, Zhao Zhidan, Niu Yaoling, *et al.* 2019. Petrogenesis and tectonic implications of the Eocene-Oligocene potassic felsic suites in western Yunnan, eastern Tibetan Plateau: Evidence from petrology, zircon chronology, elemental and Sr-Nd-Pb-Hf isotopic geochemistry[J]. *Lithos*, 340~341: 287~315.
- Wang Chengshan, Liu Zhifei, Yi Haisheng, *et al.* 2002. Tertiary crustal shortenings and peneplanation in the Hoh Xil region: Implications for the tectonic history of the northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 20(3): 211~223.
- Wang Erchie and Burchfiel B C. 1997. Interpretation of Cenozoic Tectonics in the right lateral accommodation zone between the Ailao Shan shear zone and the Eastern Himalayan Syntaxis[J]. *International Geology Review*, 39(3): 191~219.
- Wei Honghong, Wang Erchie, Wu Guoli, *et al.* 2016. No sedimentary records indicating southerly flow of the paleo-Upper Yangtze River from the first bend in southeastern Tibet[J]. *Gondwana Research*, 32: 93~104.
- Wu Chihua. 2014. The Cenozoic Tectonic Uplift Sedimentary Record of Orogenic Belt in Hoh Xil Area, the North Part of the Tibetan Plateau[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 1~149 (in Chinese with English abstract).
- Wu Jing. 2017. Redefinition of Cenozoic Chronostratigraphic Framework and Reconstruction of Paleoenvironment and Paleoelevation in the Jianchuan Basin, Southeast of Tibetan Plateau[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 1~122 (in Chinese with English abstract).
- Wu Zhenhan, Wu Zhonghai, Hu Daogong, *et al.* 2006. Features of early Miocene large paleolakes in the interior of the Qinghai-Tibet Plateau and their tectonic significance[J]. *Geological Bulletin of China*, 25(7): 782~791(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhenhan, Ye Peisheng, Hu Daogong, *et al.* 2011a. Paleogene thrust system in southern Qiangtang basin, central Tibetan Plateau[J]. *Geological Bulletin of China*, 30(7): 1 009~1 016(in Chinese with English abstract).
- Wu Zhenhan, Zhao Liguang, Ye Peisheng, *et al.* 2011b. Oligocene thrust systems in central Tibetan Plateau[J]. *Geology in China*, 38(3): 522~536(in Chinese with English abstract).
- Xin Di, Yang Tiannan, Liang Mingjuan, *et al.* 2018. Syn-subduction crustal shortening produced a magmatic flare-up in middle Sanjiang orogenic belt, southeastern Tibet Plateau: Evidence from geochronology, geochemistry, and structural geology[J]. *Gondwana Research*, 62: 93~111.
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Li Jiliang, *et al.* 2008. Restoring the original tectonic types of sedimentary basins in the orogenic belts[J]. *Geological Bulletin of China*, 27(12): 2 001~2 013 (in Chinese with English abstract).
- Yan Zhen, Wang Zongqi, Yan Quanren, *et al.* 2018. Identification and reconstruction of tectonic archetype of the sedimentary basin within the orogenic belt developed along convergent margin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(7): 1 934~1 958(in Chinese with English abstract).
- Yang Tiannan, Ding Yi, Zhang Hongrui, *et al.* 2014b. Two-phase sub-



- duction and subsequent collision defines the Paleotethyan tectonics of the southeastern Tibetan Plateau: Evidence from zircon U-Pb dating, geochemistry, and structural geology of the Sanjiang orogenic belt, southwest China[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 126(11~12): 1 654~1 682.
- Yang Tiannan, Liang Mingjuan, Fan Jinwei, *et al.* 2014a. Paleogene sedimentation, volcanism, and deformation in eastern Tibet: Evidence from structures, geochemistry, and zircon U-Pb dating in the Jianchuan Basin, SW China [J]. *Gondwana Research*, 26(2): 521~535.
- Yang Xiangdong, Tong Tabo, Wang Heng, *et al.* 2020. The contributing factor of differential crustal deformation of the Laping-Simao terrane in the southeastern edge of the Xizang (Tibetan) Plateau since late Eocene[J]. *Geological Review*, 66(4): 853~873 (in Chinese with English abstract).
- Yin An. 2010. Cenozoic tectonic evolution of Asia: A preliminary synthesis[J]. *Tectonophysics*, 488: 293~325.
- Yin An, Dang Yuqi, Wang Licun, *et al.* 2008. Cenozoic tectonic evolution of Qaidam basin and its surrounding regions (Part 1): The southern Qilian Shan-Nan Shan thrust belt and northern Qaidam basin[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 120(7~8): 813~846.
- Yin An and Harrison T M. 2000. Geologic evolution of the Himalayan-Tibetan Orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211~280.
- Yin An, Harrison T M, Murphy M A, *et al.* 1999. Tertiary deformation history of southeastern and southwestern Tibet during the Indo-Asian collision [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 111(11): 1 644~1 664.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Chang Zufeng, *et al.* 2012a. The Biluoxueshan transpressive deformation zone monitored by synkinematic plutons, around the Eastern Himalayan Syntaxis [J]. *Tectonophysics*, 574~575: 158~180.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Liu Jiang, *et al.* 2014. The Xuelongshan high strain zone: Cenozoic structural evolution and implications for fault linkages and deformation along the Ailao Shan-Red River shear zone [J]. *Journal of Structural Geology*, 69: 209~233.
- Zhang Bo, Zhang Jinjiang, Zhong Dalai, *et al.* 2012b. Polystage deformation of the Gaoligong metamorphic zone: Structures,  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  mica ages, and tectonic implications [J]. *Journal of Structural Geology*, 37: 1~18.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Chen Fengning, *et al.* 2007. Coupling between the uplift of Qinghai—Tibet plateau and distribution of basins of Paleogene-Neogene[J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 32(5): 583~597 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Hong Hanlie, *et al.* 2013. The study of the Cenozoic uplift in the Tibetan Plateau: A review[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(1): 1~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yang, Huang Wentao, Huang baochun, *et al.* 2018. 53~43 Ma deformation of eastern Tibet revealed by three stages of tectonic rotation in the Gongjue basin[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123: 3 320~3 338.
- Zhang Yang, Huang Wentao, Zhang Yuanyuan, *et al.* 2019. Detrital zircon provenance comparison between the Paleocene-Eocene Nangqian-Xialaxiu and Gongjue basins: New insights for Cenozoic paleogeographic evolution of the eastern Tibetan Plateau [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 533(109 241): 1~19.
- Zhou Jiangyu and Wang Jianghai. 2019. Early tectonic uplift affecting sedimentary filling and evolution of Paleogene basins in the central-eastern Tibetan Plateau[J]. *Acta Geologica Sinica*, 93(8): 1 793~1 813 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhijun, Jiang Yongbiao, Guo Fusheng, *et al.* 2011. Palaeogene sedimentary facies types and sedimentary environment evolution in Laping basin[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 30(3): 409~418 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 韩雪, 杨天南, 信迪, 等. 2019. 滇西三江造山带中段马登盆地两个富碱火山岩的锆石 U-Pb 定年及地质意义[J]. *贵州地质*, 36(1): 69~76.
- 李亚林, 朱利东, 戴紧根, 等. 2013. 可可西里西段羊湖盆地沉积、构造特征及其动力学意义[J]. *岩石学报*, 29(3): 1 017~1 026.
- 梁明娟. 2016. 兰坪盆地充填历史—三江造山带新特提斯构造演化的沉积记录[D]. 北京: 中国地质大学, 1~160.
- 梁明娟, 杨天南, 史鹏亮, 等. 2015. 三江造山带兰坪盆地东缘火山岩锆石 U-Pb 年代学、Hf 同位素组成[J]. *岩石学报*, 31(11): 3 247~3 268.
- 马宏杰. 2013. 中国西南横断山地区新生代地层学及古环境变化研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 1~183.
- 覃琼, 徐亚东, 张克信, 等. 2018. 滇西剑川盆地剑川组火山事件的定年和古环境研究[J]. *地质学报*, 92(10): 2 096~2 105.
- 覃琼, 徐亚东, 郑国栋, 等. 2019. 滇西剑川盆地剑川组岩石特征及火山喷发—沉积期次[J]. *地质科技情报*, 38(5): 165~173.
- 沙绍礼, 敖德恩. 2001. 大理—剑川地区新生代火山岩岩石学特征及火山喷发期研究[J]. *云南地质*, 20(4): 361~368.

- 沈青强, 曹凯, 王国灿, 等. 2017. 剑川-兰坪盆地古近纪沉积-构造变革及其区域构造意义[J]. 大地构造与成矿, 41(1): 23~41.
- 史鹏亮, 杨天南, 梁明娟, 等. 2015. 三江构造带新生代变形构造的时空变化: 研究综述及新数据[J]. 岩石学报, 31(11): 3331~3352.
- 唐靓, 薛传东, 杨天南, 等. 2016. 滇西马登地区晚二叠世-早三叠世地层组合及年代学: 火山岩锆石 U-Pb 定年证据[J]. 岩石学报, 32(8): 2535~2554.
- 吴驰华. 2014. 青藏高原北部可可西里地区新生代构造隆升的沉积记录[D]. 成都: 成都理工大学, 1~149.
- 吴旌. 2017. 青藏高原东南缘剑川盆地新生代年代地层格架、古环境与古高程重建[D]. 武汉: 中国地质大学, 1~122.
- 吴珍汉, 吴中海, 胡道功, 等. 2006. 青藏高原腹地中新世早期古大湖的特征及其构造意义[J]. 地质通报, 25(7): 782~791.
- 吴珍汉, 叶培盛, 胡道功, 等. 2011a. 青藏高原羌塘盆地南部古近纪逆冲推覆构造系统[J]. 地质通报, 30(7): 1009~1016.
- 吴珍汉, 赵立国, 叶培盛, 等. 2011b. 青藏高原中段渐新世逆冲推覆构造[J]. 中国地质, 38(3): 522~536.
- 闫臻, 王宗起, 李继亮, 等. 2008. 造山带沉积盆地构造原型恢复[J]. 地质通报, 27(12): 2001~2013.
- 闫臻, 王宗起, 闫全人, 等. 2018. 造山带汇聚板块边缘沉积盆地的鉴别与恢复[J]. 岩石学报, 34(7): 1943~1958.
- 杨向东, 仝亚博, 王恒, 等. 2020. 青藏高原东南缘兰坪-思茅地体晚始新世以来差异性地壳变形的成因讨论[J]. 地质论评, 66(4): 853~873.
- 张克信, 王国灿, 陈奋宁, 等. 2007. 青藏高原古近纪-新近纪隆升与沉积盆地分布耦合[J]. 地球科学, 32(5): 583~597.
- 张克信, 王国灿, 洪汉烈, 等. 2013. 青藏高原新生代隆升研究现状[J]. 地质通报, 32(1): 1~18.
- 周江羽, 王江海. 2019. 青藏高原中东部早期构造隆升对古近纪盆地充填和演化的影响[J]. 地质学报, 93(8): 1793~1813.
- 朱志军, 姜勇彪, 郭福生, 等. 2011. 兰坪盆地古近纪沉积相类型及沉积环境演化[J]. 岩石矿物学杂志, 30(3): 409~418.