

滇西剑川盆地剑川组火山事件的定年和古环境研究

覃琼^{1,2)}, 徐亚东^{1,3,4)}, 张克信^{1,3,5)}, 吴旌^{1,3)}, 郑国栋¹⁾, 曹凯¹⁾, 王国灿^{1,5)}, 戴婕⁴⁾

1) 中国地质大学(武汉)地球科学学院, 武汉, 430074;

2) 贵州省有色金属和核工业地质勘查局物化探总队, 贵州都匀, 558000;

3) 生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉, 430074;

4) 国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室, 中国地质调查局成都地质调查中心, 成都, 610081;

5) 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 武汉, 430074

内容提要:通过对剑川组顶部凝灰质砂岩和底部晶屑凝灰质火山角砾岩进行 U-Pb 锆石测年, 结合前人对剑川组内部侵入的花岗岩脉体的数据, 本文限定剑川组火山事件发生于 $36.23 \pm 0.88 \sim 35.46 \pm 0.76$ Ma, 为始新世晚期蔡家冲期。剖面上段发现丰富的孢粉化石, 反映该时期剑川盆地周缘为常绿—落叶阔叶混交林, 植被具有明显的垂直分带性; 结合化石的最近亲缘类型的海拔、年均温和年降水量数据, 进行共存分析得出始新世晚期剑川盆地的海拔在 1900 ± 100 m, 年均温在 $13.3 \sim 14.9$ °C, 年降水量在 $863.3 \sim 1344$ mm。综合对比分析古生物化石、氧同位素、火山事件和构造热年代学数据, 反映始新世晚期受印度和欧亚板块碰撞的影响, 滇西地区具有显著的地势差异, 高海拔可达 $2000 \sim 2700$ m, 而低海拔可降到 1200 m 以下, 甚至接近海平面, 并伴生一系列拉分盆地的形成和强烈的火山事件。

关键词: 滇西剑川盆地; 火山沉积; 锆石定年; 孢粉; 古环境

20 世纪末以来, 青藏高原的构造隆升格局和气候演化一直是地质学的研究热点(Xu Zhiqin et al., 2016; Sun et al., 1998; Cyr et al., 2005; He Kezhao et al., 1996; Rowley et al., 2006; Song Xiaoyan et al., 2010; Wang Guocan et al., 2011; Wei Yi et al., 2016; Zhang Kexin et al., 2008; Zhang Kexin et al., 2010, 2013; Xu Zhiqin et al., 2016; Xu Yingchao et al., 2017)。通过对青藏高原隆升的研究, 来分析其周缘地区在隆升时的响应过程也得到很多学者的关注。剑川盆地是印度板块与欧亚大陆碰撞过程形成的一个新生代拉分盆地(Zhang Kexin et al., 2010), 作为青藏高原东南缘关键区的一个大型沉积盆地得到很多学者的关注。该盆地在新生代发育一套火山喷发相—火山沉积相组合的剑川组, 近年来对剑川组的研究也越来越深入(Hoke et al., 2014; Ma Hongjie., 2013; Loraine Gourbet et al., 2017; Sha Shaoli et al., 2001; Wan Shaokai et al., 2005)。对于剑川组地层的时代厘

定, 存在着古近系—新近系的说法, 对剑川组古环境的认识也有很大的争议(Hoke et al., 2014; Loraine Gourbet et al., 2017; Li Shanying et al., 2015; Sun Bainian et al., 2011; Zhang Liansheng et al., 1999), 如 Ma Hongjie. (2013) 将双河组地层划归到剑川组之上的新近系, Hoke et al. (2014) 通过氧土壤同位素认为剑川盆地在始新世海拔在 3300 m 左右。研究该地层的时代、古海拔和古环境能够对剑川盆地的形成乃至青藏高原的隆升有以小见大的效果。因此, 本文根据剑川组地层的火山事件和沉积特征, 结合前人已经取得的测年数据和本文对剑川组的岩石测年, 约束剑川组的火山事件时代, 构建地层格架; 通过对剑川组孢粉化石的鉴定和统计, 利用共存分析方法研究剑川盆地古海拔和古气候, 综合剑川盆地的古环境恢复和青藏高原东南缘的隆升格局, 探讨剑川盆地火山事件的特征及其对青藏高原隆升的响应。

注: 本文为国土资源部沉积盆地与油气资源重点实验室开放基金(cdcgs2018001)、国家自然科学基金项目(41302279)和中国地质调查局项目(1212011121261, 12120113012500)等联合资助的成果。

收稿日期: 2017-06-22; 改回日期: 2018-02-27; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 覃琼, 男, 1993 年生。硕士研究生, 主要从事沉积学、水工环地质学的研究工作。Email: 1050764603@qq.com。通讯作者: 徐亚东, 男, 1983 年生。博士, 从事沉积学、古生物学和青藏高原地质的研究。Email: yadong.xu@cug.edu.cn。

1 区域地质背景及样品采集

剑川盆地位于云南省大理州,是一个在逆冲挤压环境下,于羌塘—三江造山带和冈底斯造山带连接处形成的走滑拉分盆地(Huangfu Gang, 2009; Wang Guocan et al., 2011),受到乔后断裂、剑川断裂和丽江断裂的控制(Tang Yong, 2014; Zhang Kexin et al., 2015)。新生界是本次研究的主要对象,古近系发育咸化湖泊环境沉积的勐野井组(E_1m)、山麓相或湖盆边缘相—河湖相沉积的宝相寺组(E_2b)、湖相沉积的九子岩组(E_2jz)、湖泊三角洲相的双河组(E_2s)、火山岩相为主体的剑川组(E_2jc),新近系扇三角洲—湖沼环境沉积的三营组(N_2s)和盆地山前河流冲积的第四系(Q)(Loraine Gourbet et al., 2017)(图 1)。本文于剑川县双河煤矿附近实测剑川组地层,采集了大量岩石标本和孢粉样品,在剖面第 4 层和 49 层分别采得锆石样品。通过锆石测年结合前人的测年结果,限定剑川组火山事件的时代;通过对剖面特征的分析,划分剑川组剖面火山期次和旋回;对剖面 31 层发现的丰富孢粉化石,进行鉴定并作共存分析,恢复了剑川组古环境。

2 岩相分析和火山—沉积旋回

火山岩喷发和沉积旋回识别方法有地质界面的识别、岩性组合和岩相序列(Yang Di et al., 2011)。常见地质界面包括界面风化壳、沉积夹层、松散层、火山灰层等(Wang Pujun et al., 2006);火山喷发表现周期变化导致喷出物质的成分、厚度等具有很大差异,这是岩性组合的划分;对于中基性火山岩的理想完整的火山岩相序为爆发相—喷溢相—火山通道相—侵入相—火山沉积相(Wang Pujun et al., 2006)。

首先,本文通过岩性分析和组合,对照中基性岩的相序,划分火山岩相和亚相的火山岩相序;其次,通过相序的特征,建立火山岩期次;最后,结合期次和相序,建立火山岩喷发和沉积旋回。剑川组岩石岩性分为两段:下段为下部的火山熔岩—上部的火山碎屑岩,上段为沉火山碎屑岩—沉积岩,分别为喷溢相、爆发相、火山沉积相、冲积扇相和火山口湖相。其中,底部 2~7 层为火山熔岩为主的喷溢相;8~29 层火山碎屑岩为主的爆发相,划分为集块岩和火山角砾岩岩性为主的空落亚相和以凝灰岩为主的热碎屑流亚相;30~38 层为沉火山碎屑岩的火山沉积

相,分为再搬运火山碎屑沉积岩亚相和凝灰岩沉积岩亚相;39 层和 40 层下部表现短期的冲积扇的扇中亚相,40 层上部沉积了较厚的代表火山口湖相的滨湖亚相;41~52 层为厚层的冲积扇沉积。

2.1 下段喷发旋回

剑川组下段的火山岩相由底部溢流相和上部爆发相构成,反映剑川盆地火山活动较强烈的时期,由于火山活动喷发的周期性特征,构成了多个由空落亚相—热碎屑流亚相形成的旋回和期次。

第一旋回(2~14 层):共 135.7m。该旋回分由两个空落亚相—热碎屑流亚相的火山岩相组合构成,每个火山岩相的组合由二个期次构成。

第二旋回(15~30 层):共 148.45m。由 4 个空落亚相—热碎屑流亚相的火山岩相组合构成,由二个期次组成。

2.2 上段火山—沉积旋回

剑川组上段由下部火山沉积相的沉火山碎屑岩、上部沉积相的凝灰质砂岩—砾岩的岩石构成。下部火山沉积相分为再搬运火山碎屑沉积岩亚相和凝灰质沉积亚相;上部沉积相主要分为火山口湖相和冲积扇。将剑川组上段整体概括为一个火山—沉积旋回(31~52 层),共 58.03m。

3 锆石测年

3.1 测试流程

在剑川组剖面第 4 层采集的晶屑凝灰质火山角砾岩(编号 S40-T1)、剑川组 49 层凝灰质砂岩(编号 D20150519-17)。挑样、制靶由廊坊诚信地质服务有限公司完成,锆石测试分析由武汉上谱分析测试有限公司采用 U-Pb 锆石同位素测年完成。对挑选的锆石样进行制靶,通过 1/2 抛光处理、全部拍摄阴极发光图和透反射图,选取环带明显、无明显裂痕的避开包裹体的锆石,用高灵敏度二次探针进行分析。数据处理采用 Isoplot 锆石数据处理软件。具体的锆石测年实验测试过程可参见 Hou Kejun et al. (2009)。

3.2 分析结果

对剑川组凝灰岩的锆石选取最年轻年龄的数据(表 1,表 2),利用 Isoplot 锆石数据处理软件,得出剑川组顶部凝灰质砂岩中锆石最年轻沉积年龄为 $35.46 \pm 0.76\text{Ma}$,置信度为 95%(图 2a、2c);剑川组底部晶屑凝灰质火山角砾岩中锆石最年轻沉积年龄为 $36.23 \pm 0.88\text{Ma}$,置信度为 95%(图 2b、2d)。

锆石环带明显,打点时尽量贴锆石边部,捕捉到

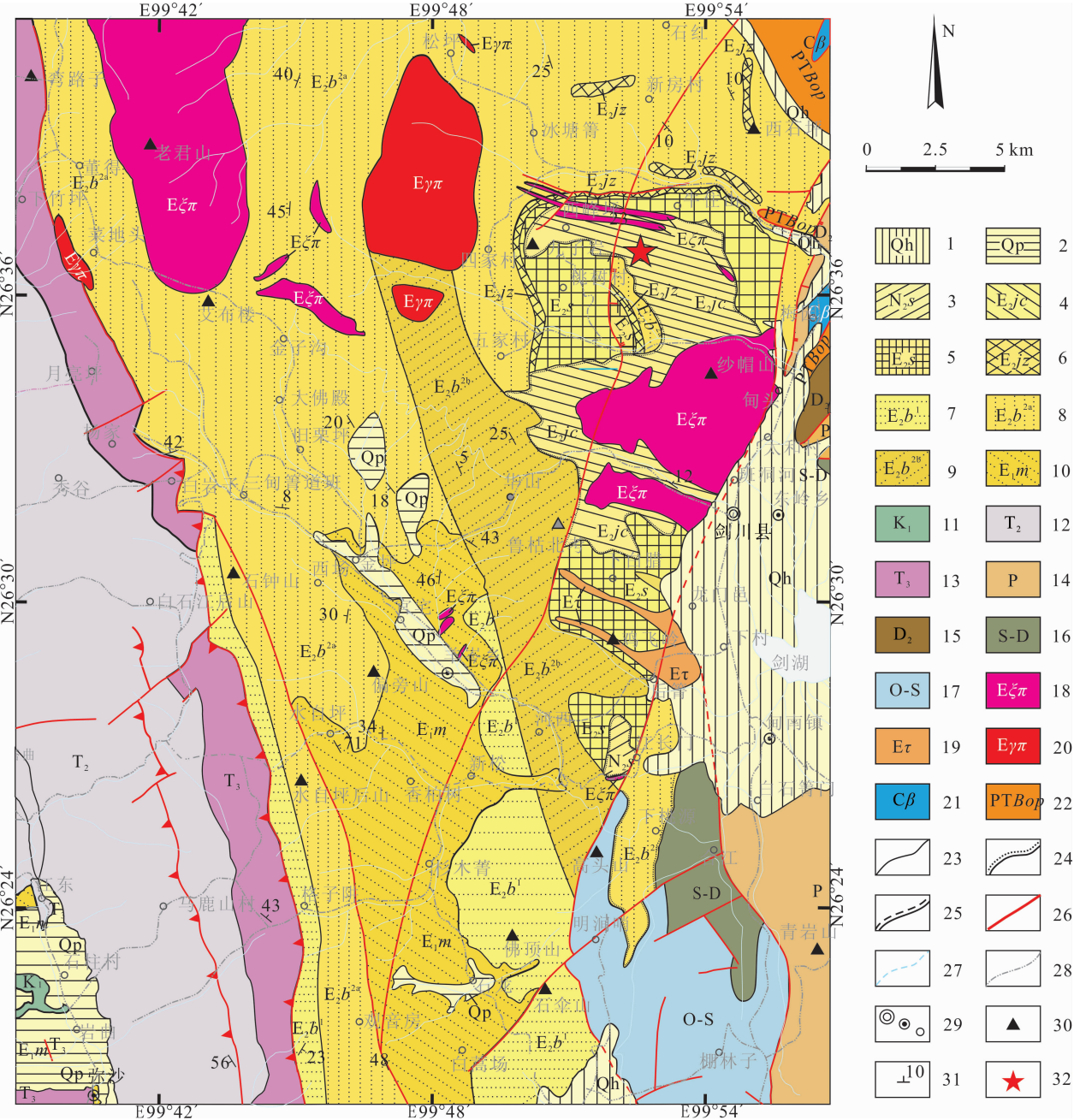


图 1 滇西剑川盆地研究区地质图

Fig. 1 Geological map of the Jianchuan Basin in western Yunnan Province

1—全新统;2—更新统;3—新近系三营组;4—始新统剑川组;5—始新统双河组;6—始新统九子岩组;7—始新统宝相寺组下段;8,9—始新统宝相寺组上段;10—古新统勐野井组;11—白垩系;12—中三叠统;13—下三叠统;14—二叠系;15—中泥盆统;16—志留系—泥盆系;17—奥陶系—志留系;18—正长斑岩;19—粗面岩;20—花岗斑岩;21—玄武岩脉;22—P/T 混杂岩;23—整合接触界线;24—角度不整合界线;25—平行不整合界线;26—断层;27—水系;28—道路;29—地名;30—山峰;31—产状;32—研究位置

1—Holocene;2—Pleistocene;3—Neogene Sanying Formation;4—Eocene Jianchuan Formation;5—Eocene Shuanghe Formation;6—Eocene Jiuziyan Formation;7—Eocene Lower Baoxiangsi Formation;8,9—Eocene Upper Baoxiangsi Formation;10—Paleocene Mengyejing Formation;11—Cretaceous;12—Middle Triassic;13—Lower Triassic;14—Permian;15—Middle Devonian;16—Silurian-Devonian;17—Ordovician-Silurian;18—syenite porphyry;19—trachyte;20—granophyre;21—basaltic veins;22—P/T Melange;23—conformity boundary;24—angular unconformity boundary;25—parallel unconformity boundary;26—fault;27—water system;28—road;29—local place name;30—mountain peak;31—attitude;32—research location

锆石最年轻的年龄,即剑川组地层形成时的物质来源,限定其物源的年龄。通过对剑川组火山岩的年

龄限定,结合前人对剑川组穿插脉体的测年结果,厘定剑川组地层的形成时代。

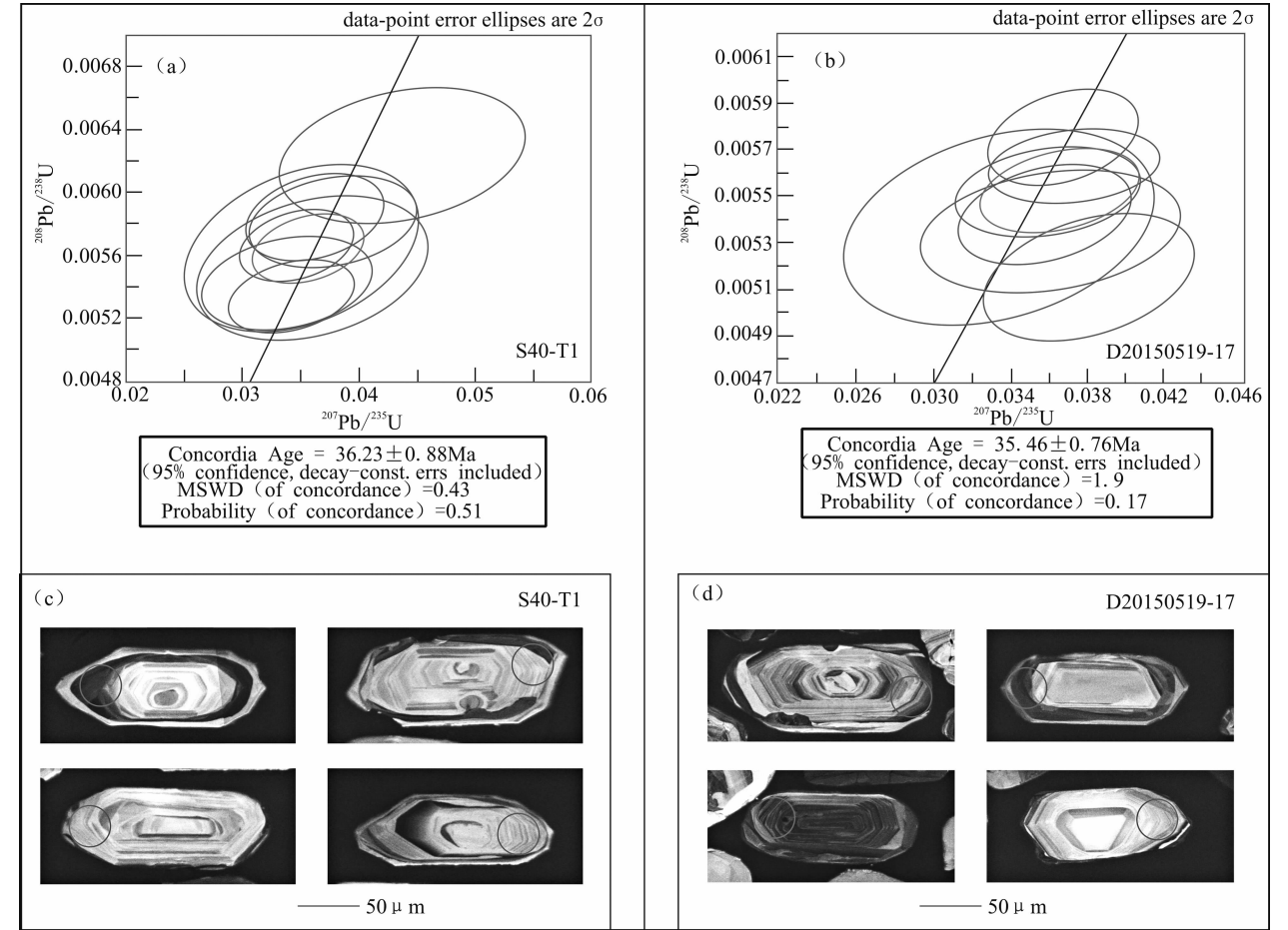


图 2 滇西剑川组两件火山碎屑岩锆石 U-Pb 年龄谐和图和阴极发光图

Fig. 2 Zircon cathodoluminescence (CL) images and U-Pb concordia diagram of the volcanic clastic rocks from the Jianchuan Formation in the western Yunnan Province

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytic data for tuffaceous volcanic breccia of Jianchuan Formation																	
测点	同位素比值						年龄(Ma)								²³² Th	²³⁸ U	²³⁸ U/ ²³² Th
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ			
S40-T1-1	0.0538	0.0031	0.038	0.0022	0.0052	0.0001	365	136.1	37.9	2.2	33.1	0.7	35.6	1.2	503	855	1.7765
S40-T1-2	0.0502	0.0044	0.036	0.0027	0.0053	0.0001	206	189	35.9	2.7	34.4	0.7	36.9	1.3	1018	1331	1.314
S40-T1-3	0.0507	0.0062	0.0334	0.0033	0.0054	0.0002	228	272	33.4	3.2	34.5	1.1	36	2.2	584	895	1.5194
S40-T1-4	0.0483	0.0024	0.0358	0.0018	0.0054	0.0001	122	105.5	35.7	1.8	34.8	0.6	34.2	0.7	1291	864	0.6924
S40-T1-5	0.0471	0.0026	0.036	0.0019	0.0055	0.0001	53.8	135	35.9	1.9	35.5	0.5	34.6	0.7	1484	952	0.6939
S40-T1-6	0.0486	0.0024	0.0373	0.0018	0.0056	0.0001	128	80.5	37.2	1.7	36.2	0.4	37.3	0.7	1785	1262	0.7375
S40-T1-7	0.0469	0.0022	0.0367	0.0016	0.0058	0.0001	42.7	111.1	36.6	1.5	37	0.5	36.7	0.7	5479	3923	0.7299
S40-T1-8	0.0579	0.0104	0.0443	0.0071	0.0062	0.0003	528	402	44.1	6.9	40	1.7	39.3	2	1205	932	0.78
S40-T1-9	0.0385	0.0075	0.0403	0.0058	0.0062	0.0003	error		40.1	5.7	40.1	2	58.8	3.8	112	155	1.483
S40-T1-10	0.0562	0.0063	0.0475	0.0041	0.0063	0.0002	461	255	47.1	4	40.8	1.4	39.6	1.6	172	178	1.1115
S40-T1-11	0.0561	0.0057	0.0468	0.0041	0.0064	0.0002	457	260	46.4	4	41.2	1.2	42	1.6	176	252	1.4991
S40-T1-12	0.0548	0.0072	0.0485	0.0057	0.0069	0.0003	467	296	48.1	5.5	44.1	1.7	37.3	2.2	99	125	1.367
S40-T1-13	0.0485	0.0023	0.0452	0.002	0.0069	0.0001	124	115	44.9	2	44.1	0.6	48.9	1.4	718	1459	2.1253
S40-T1-14	0.0462	0.0037	0.0637	0.0068	0.0098	0.0007	9.4	185.2	62.7	6.4	62.7	4.5	33.4	2	165	304	2.0292
S40-T1-15	0.0534	0.0025	0.2238	0.011	0.0303	0.0005	346	107	205	9.2	193	3.2	56.5	3.6	303	1245	4.1107

表 2 剑川组凝灰质砂岩(D20140519-17)LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 同位素分析结果
Table 2 LA-ICP-MS zircon U-Pb analytic data for tuffaceous sandstone of Jianchuan Formation

测点	同位素比值						年龄(Ma)						²³² Th	²³⁸ U	²³⁸ U/ ²³² Th
	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²⁰⁶ Pb	1σ	²⁰⁷ Pb/ ²³⁵ U	1σ	²⁰⁶ Pb/ ²³⁸ U	1σ	²⁰⁸ Pb/ ²³² Th	1σ	
D20140519-17-1	0.0472	0.0032	0.0342	0.0022	0.0053	0.0001	61.2	156	34.2	2.2	34.3	0.6	33.1	1.3	321
D20140519-17-3	0.0457	0.0044	0.0339	0.0030	0.0054	0.0001	error		33.8	2.938	34.9	0.765	32.5	1.742	152
D20140519-17-4	0.0495	0.0067	0.0360	0.0040	0.0055	0.0002	172	289	35.9	4.0	35.5	1.2	39.4	2.5	134
D20140519-17-5	0.0520	0.0093	0.0351	0.0041	0.0056	0.0002	283	366.62	35.0	4.008	36.3	1.371	35.2	2.298	94.5
D20140519-17-6	0.0456	0.0028	0.0347	0.0020	0.0057	0.0001	error		34.7	1.952	36.4	0.594	33.0	1.217	247
D20140519-17-7	0.0505	0.0049	0.0379	0.0029	0.0058	0.0001	220	207	37.8	2.9	37.4	0.8	40.7	1.6	166
D20140519-17-8	0.0467	0.0034	0.0363	0.0024	0.0058	0.0001	31.6	180	36.2	2.3	37.5	0.7	38.9	1.7	194
D20140519-17-9	0.0544	0.0060	0.0438	0.0043	0.0062	0.0002	391	250	43.5	4.2	40.0	1.1	40.4	1.8	151

Lorraine Gourbet et al. (2017)在剑川盆地双河组和剑川组内发现了多条花岗岩侵入脉体,其形成时代应该在双河组和剑川组之后,测得剑川组脉体侵入年龄在 35.4±0.8Ma。Zhang Liansheng et al. (1999)对剑川地区粗面岩测年,其结果在 34.4±0.4Ma 和 34.5±0.3Ma 之间。

本次论文通过碎屑锆石限定剑川组火山事件的年龄为 35.46±0.76~ 36.23±0.88Ma,虽然碎屑锆石的年龄反映的是火山喷发前物源形成时的年龄,这个年龄数据较地层形成时的年龄老,但是综合前人对剑川组脉体的测年结果(Lorraine Gourbet et al., 2017),可以限定剑川组的年龄在 35.46±0.76~ 36.23±0.88Ma,为始新世晚期蔡家冲期。

4 孢粉

4.1 孢粉鉴定统计

在剑川组剖面 31 层得到孢粉化石(图 3),鉴定和

统计 375 粒孢粉,被子植物孢粉(83%),主要有: *Quercoidites*、*Carpinipites*、*Cupuliferoipollenites*、*Engelhardtoidites* 等;裸子植物花粉(13%),主要有 *Podocarpidites*、*Pinuspollenites*、*Cycadopites* 等;少量蕨类植物孢子(4%),主要有 *Lophotriletes*、*Extrapunctatosporis* 等。剑川组孢粉化石特征清晰,没有经过后期腐蚀和成岩作用的影响。始新世剑川盆地主要植被类型为乔木(*Taxodiaceae*、*Quercus*、*Engelhardia* 等)、少数灌木(*Labiatae*、*Cipadessa* 等)构成的常绿—落叶混交林;植被具有代表高山(*Abies*、*Pinus*)和低海拔(*Eucommia*、*Engelhardia* 等)类型的混合,反映剑川盆地当时存在明显的地势差异。

4.2 共存分析

4.2.1 数据来源

通过查找 80 卷的《中国植物志》(Qian Chongshu et al., 2004),参考中国气象局 2060 个气象观测点数

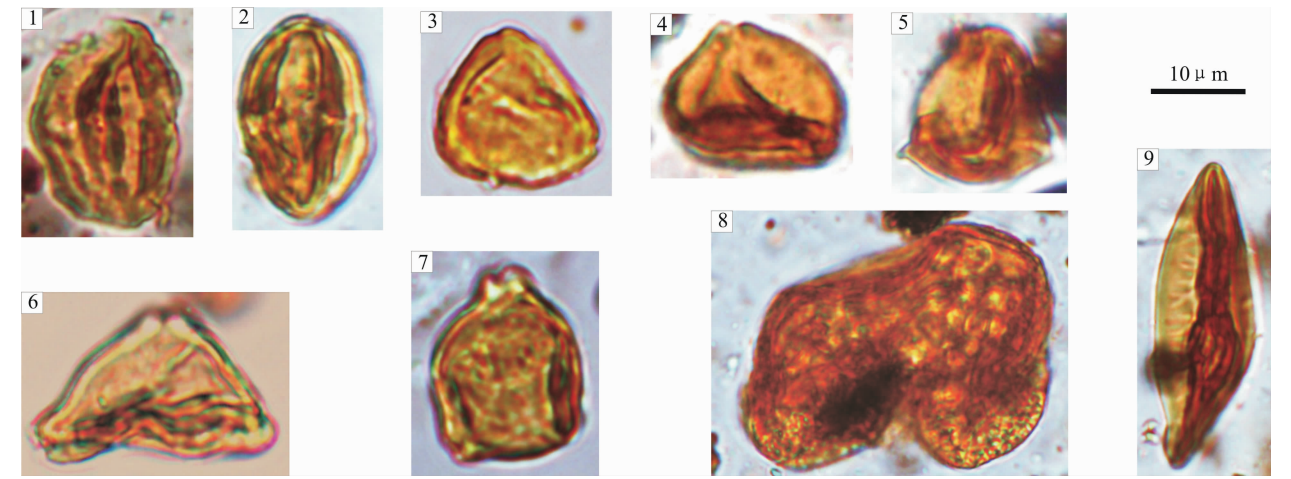


图 3 剑川盆地剑川组主要孢粉化石镜下照片

Fig. 3 The main polymorphs of the Jianchuan Formation in the Jianchuan Basin
1—亨氏栎粉;2—梭形栗粉;3—小黄杞粉;4—莱茵苗榆粉;5—拟三缝莫米粉;6—稀少拟桦粉;7—明亮肋桦粉;8—小双束松粉;9—梭形麻黄粉
1—*Quercoidites henrici*; 2—*Cupuliferoipollenites fusus*; 3—*Engelhardtoidites levis*; 4—*Engelhardtioipollenites punctatus*; 5—*Momipites paratriletes*; 6—*Betulaceoipollenites infaquens*; 7—*Betulapollenites claripites*; 8—*Pinuspollenites minutus*; 9—*Ephedripites fusiiformis*

据对应地区最近气候台站观测点中国地面累年值年

和年降水 MAP)变化范围,统计清理了主要孢粉化石

值数据集(1981~2010 年)中气候参数(年均温 MAT

最近亲缘种属的生长海拔、年均温和年降水量(表 3)。

表 3 主要孢粉化石现存最近亲缘类型生长环境统计表

Table 3 Growth environment of the main palynomorphs based on the nearest living relatives data

孢粉类型	现存最近亲缘属	分布海拔(m)	年均温(MAT)	年降水(MAP)
<i>Ephedripites</i>	<i>Ephedra</i>	1800~4000	-4.9~14.9	61.5~1344
<i>Ostryoiipollenites</i>	<i>Ulmus</i>	500~2900	13.3~25.5	475~1870
<i>Betulaepollenites</i>	<i>Betula</i>	400~4000	-4.9~23.2	292~1816
<i>Betulaceoiipollenites</i>				
<i>Abiespollenites</i>	<i>Abies</i>	2500~4200	2.8~23	171~1785
<i>Quercoidites</i>	<i>Quercus</i>	500~3900	-4.9~25.5	95.4~1870
<i>Pinuspollenites</i>	<i>Pinus</i>	500~3500	-4.4~25.8	403~2446.7
<i>Momipites</i>	<i>Juglans</i>	400~3300	0~27.5	66.7~2150.3
<i>Juglanspollenites</i>				
<i>Caprifoliipites</i>	<i>Sambucus</i>	300~3600	-3.9~24.4	62.9~2806.3
<i>Cedripites</i>	<i>Cedrus</i>	1300~3300	10.2~20.9	33.4~1644
<i>Cycadopites</i> *	<i>Cycas</i>	700~2900	11.3~19.7	714.3~1586.5
<i>Carpiniipites</i>	<i>Carpinus</i>	700~2800	12.9~21.5	863.3~1708.9
<i>Rhoipites</i>	<i>Toxicodendron</i>	400~2800	-0.9~23.8	62.9~2441.1
<i>Taxodiaceaeipollenites</i> *	<i>Taxodiaceae</i>	500~2800	7.8~24.7	446~1654
<i>Cupuliferoipollenites</i>	<i>Castanea</i>	400~2000	8.5~24.7	620~1870
<i>Meliaceoidites</i> *	<i>Cipadessa</i>	350~2200	-0.9~24.4	491.7~2806.3
<i>Liquidambarpollenites</i> *	<i>Liquidambar</i>	600~2000	13.3~25.5	475~1870
<i>Platycaryapollenites</i>	<i>Platycarya</i>	450~2000	-0.9~23.8	62.9~2806.3
<i>Podocarpidites</i>	<i>Podocarpus</i>	400~3000	8.5~24.7	798~1654

注: * 引用徐增连、孙柏年等的数据(Xu Zenglian., 2015;Sun Bainian et al., 2011)

4.2.2 数据来源

对孢粉化石进行古海拔(图 4)和古气候(图 5)的共存分析,为降低埋藏学效应对化石数据的影响,前人在运用共存分析法定量古海拔和古气候时主要考虑某植物类群出现与否,但不管其相对含量,但是考虑到植物的耐受性,大量附生在优势植物类群下形成的生态小环境中的其他植物的参与势必会增大分析的误差。因此,我们选取植被类群的优势植物类群(或建群种)作为古海拔和古气候共存分析的主要依据,根据孢粉组合中优势植物类群进行共存分析。

通过对剑川组孢粉化石的研究,指示始新世晚期蔡家冲阶剑川盆地的古植被为亚热带常绿一落叶阔叶混交林,并存在亚热带山地植被组合,具有一定的垂直分带性,共存分析法重建的古海拔在 1800~2000m 之间,MAT 为 13.3~14.9℃,MAP 为 863.3~1344mm。对比剑川地区现今的气象观测站数据(MAT 为 12.6℃,MAP 为 749.2mm),研究结果均高于现今的气候数据,反映始新世晚期以来存在区域抬升或气候变迁。

5 讨论

剑川地区白垩系—古近系出露红色含石膏的砂

泥质咸水湖相沉积的勐野井组和紫红色砾岩、砂岩的宝相寺组,反映较为干旱的气候环境;到始新世晚期开始发育以双河组为代表的淡水湖泊相地层,在双河组地层产丰富的植物叶片、煤层和双壳类化石,表现相对潮湿的气候。

本文认为剑川盆地始新世晚期表现出比当今更为温暖湿润的气候环境,古海拔在 1900±100m 之间,MAT 为 13.3~14.9℃,MAP 为 863.3~1344mm。到中新世,Sun Bainian et al. (2011)通过叶缘分析和孢粉共存分析,与剑川、洱源、腾冲等地的古气候参数和现代气候参数对比,认为剑川盆地在中新世温度较高,气候温和,气温高达 13.8~21.7℃,MAP 为 987.2~1546.4mm。对比现今的气候,剑川盆地当前的海拔为 2000~4300m,年均温为 13.1℃,年降水 572.7mm。通过时间纵向上的对比,指示了剑川盆地在中生代与新生代之交气候干旱,到始新世晚期—中新世气候变得潮湿,之后由于构造抬升的影响导致气温下降、降水减少达到今天的水平。

Hoke et al. (2014)在云南兰坪、剑川、洱源等 7 个地区采集碳酸盐岩样品,并通过澜沧江水样进行校正,古近纪稳定同位素古高程计算采用 Rowley et al. (2006)的模型,新近纪碳氧同位素古高程则采

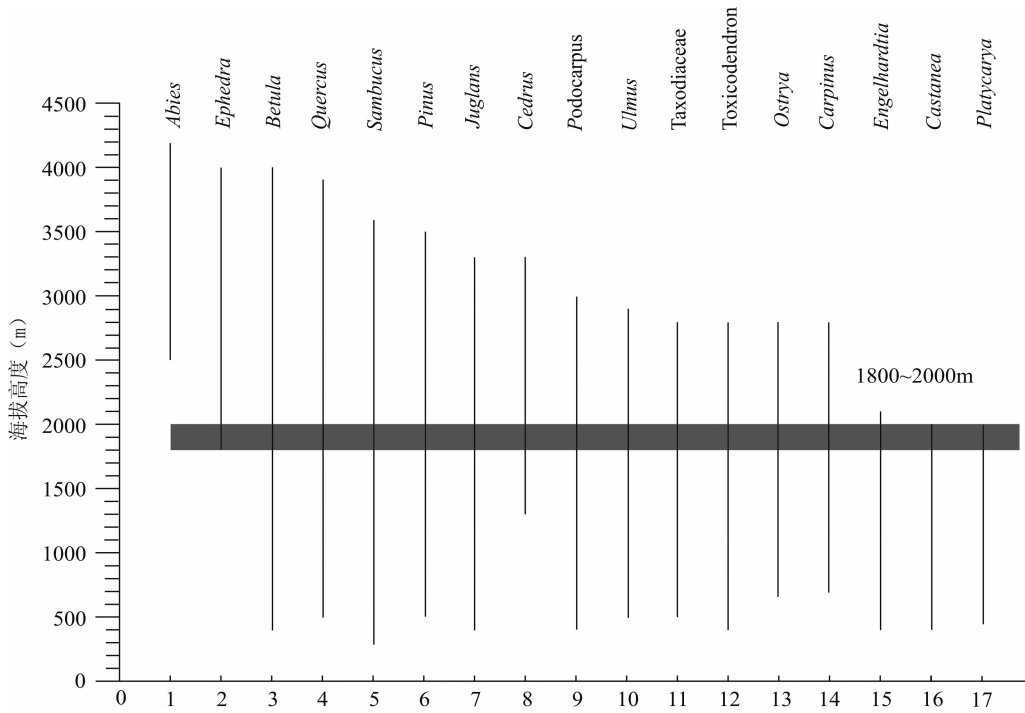


图 4 孢粉共存分析厘定古海拔

Fig. 4 Paleoelevation reconstruction on the basis of the Coexistence Analysis of the main palynomorphs

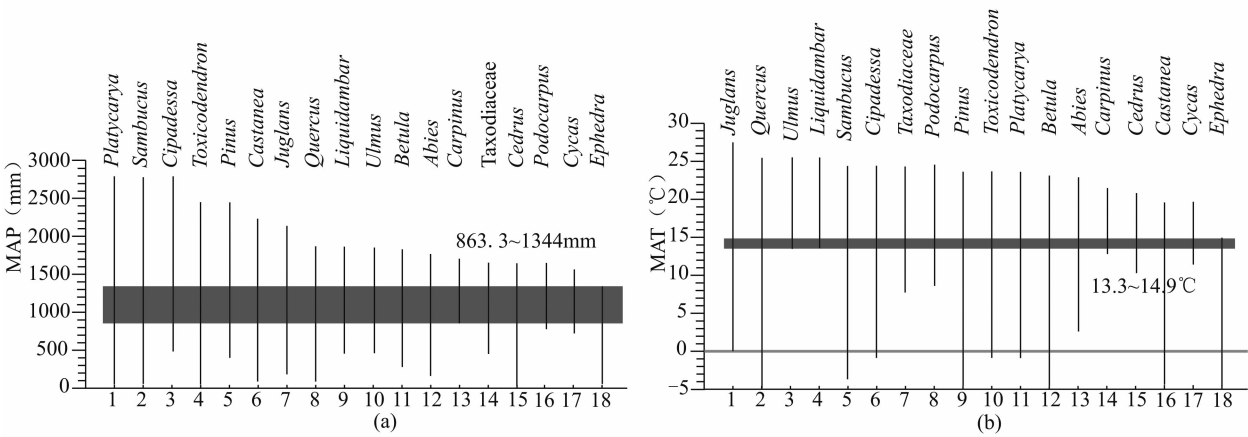


图 5 孢粉共存分析厘定古气候

Fig. 5 Paleoclimate reconstruction

(a)—古年降水；(b)—古年均温

(a)—average annual precipitation; (b)—average annual temperature on the basis of the coexistence analysis of the main palynomorphs

用现代澜沧江同位素海拔关系公式计算获得，计算结果认为青藏高原东南缘在始新世已近达到了现今海拔高度，约 2700m 左右，因此 Hoke et al. (2014) 认为青藏高原较现今应该继续往东扩张 1000km。Li Shanying et al. (2015) 通过收集剑川盆地、芒康盆地和小龙潭盆地共 48 个新生代湖泊碳酸盐并做碳氧同位素分析，采用 ±5℃ 的校正来考虑湖水与 MAAT 之间的温差，认为剑川盆地从 40Ma 的海拔在 2600m 左右，同 Hoke et al. (2014) 的结论基本

一致。

本文通过对剑川盆地剑川组孢粉的海拔共存分析，得出始新世晚期剑川盆地海拔在 1900±100m 之间，孢粉型中包含较高海拔和较低海拔、较干旱和偏湿润的化石类型，揭示剑川盆地始新世晚期具有明显的植被垂直分带性，地势差异明显。同时，Lorraine Gournbet et al. (2017) 通过对以上二者碳氧同位素数据的修订，认为剑川盆地在始新世时期，可能处于较低的海拔(约 1200m)，并发现了生活于较

低海拔的化石两栖犀 *Zaisanamynodon* sp. ,认为始新世以来发生显著的地壳抬升。此外,剑川盆地九子岩组灰岩发现的龙介类化石指示始新世时期该地区为海相沉积特征(Li Dingrong et al. ,1986),当时表面海拔接近海平面。

通过对比分析青藏高原已有的大量构造热年代学数据,在 35~38Ma 藏南、冈底斯和川西滇东普遍记录了强构造隆升事件,并与整个高原的数据吻合(Wang Guocan et al. ,2011)。此外,印度和欧亚的碰撞使得东侧的地壳抬升造成新特提斯洋沿雅鲁藏布江缝合带闭合、海水从东向西退出(Zhang Kexin et al. ,2010),反映当时的古地理格局是东高西低。同时,两大板块的碰撞导致了区域性的哀牢山—金沙江钾质碱性岩带在滇西地区的延伸和火山事件,发育一系列的老君山岩体、玉召块岩体(Wan Shaokai et al. ,2005;Xia Bin et al. ,2005),以及火山洼地河湖沉积(Li Yong. ,2012;Lin Qingcha. ,2007;Zhang Kexin et al. ,2010)。

6 结论

基于对剑川盆地剑川组岩性岩相、锆石测年、孢粉化石和前人对比讨论的研究,研究剑川组火山旋回和期次特征、时代厘定、古环境分析和古地理和构造特征,主要认识有以下几点:

(1)滇西剑川盆地火山事件的喷发于 36.23±0.88~35.46±0.76Ma,为始新世晚期蔡家冲期;剑川组火山活动由强到弱,表现为明显的旋回性,下段为火山喷发旋回,上段为火山—沉积旋回;

(2)始新世晚期剑川盆地总体植被为常绿—落叶阔叶混交林—亚热带常绿阔叶林,植被垂直分带明显,盆地海拔在 1900m 左右,年均温在约 13.3~14.9℃,年降水在 863.3~1344mm 之间;

(3)始新世晚期欧亚板块和印度板块发生全面碰撞,新特提斯洋从藏南—滇西地区发生海退,滇西地区表现为显著的地势差异,氧同位素和古植物化石反映区域高海拔可达 2000~2700m,而区域低海拔可降到 1200m 以下。

致谢:感谢陈林、杨文麟、李杨、王嘉轩、刘威等协助完成野外工作。

References

Sun Linchung, Ching Hua Lo, Tung Yi Lee, Zhang Yuquan, Xie Yingwen, Li Xianhua, Kuo Lung Wang, Pei Ling Wang. 1998. Diachronous uplift of the Tibetan Plateau starting 40 Myr ago.

Nature, 394(6695):769~773.

Andrew J. Cyr, Brian S. Currie, David B. Rowley. 2005. Geochemical evaluation of Fenghuoshan Group lacustrine carbonates, North-Central Tibet: Implications for the paleoaltimetry of the Eocene Tibetan Plateau. *Journal of Geology*, 113(5):517~533.

He Kezhao, He Haosheng, Cai Hongbiao. 1996. The Formation and Evolution of the Western Yunnan Orogenic Belt. *Geological Review*, 02:97~106 (in Chinese with English abstract).

Gregory D. Hoke, Jing Liu Zeng, Michael T. Hren, Gregory K. Wissink, Carmala N. Garziane. 2014. Stable isotopes reveal high southeast Tibetan Plateau margin since the Paleogene. *Earth and Planetary Science Letters*, 394:270~278.

Hou Kejun, Li Yanhe, Tian Yourong. 2009. In situ U-Pb zircon dating using laser ablation-multi ion counting-ICP-MS. *Mineral Deposits*, 28:481~492.

Huang Fugang. 2009. Research on the Seismicity in Yunnan, Anhui: China University of Science and Technology of China (in Chinese with English abstract), 1~184.

Li Dingrong, Huang Xinggen, Wang Ande, Yu Shene. 1986. Discovery and significance of early Tertiary marine limestone in northwestern Yunnan Province. *Chinese Science Bulletin*, 292~296 (in Chinese with English abstract).

Li Shanying, Brian S. Currie, David B. Rowley, Miquela Ingalls. 2015. Cenozoic paleoaltimetry of the SE margin of the Tibetan Plateau: Constraints on the tectonic evolution of the region. *Earth and Planetary Science Letters*, 432:415~424.

Li Yong. 2012. Geochronology, Petrogenesis and Geological significance of the Cenozoic potassic magmatic rocks insanjiang area, western Yunnan. Beijing: China University of Geosciences(Beijing) (in Chinese with English abstract), 1~110.

Lin Qingcha. 2007. The geochemical character of potassic alkali rocks zone in the Ailaoshan-Jinshajiang and its tectonic implications. Guangzhou: Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences (in Chinese with English abstract), 1~73.

Liu Ying, Zheng Mianping, Zhang Zhen, Yu Changqing, Miao Zhongying, Zhang Kai, Gao Lei. 2017. Salt Tectonic and Prospecting Potassium Research in Simao Basin. *Geological Review*, 03:568~580.

Lorraine Gourbet, Philippe Hervé Leloup, Jean-Louis Paquette, Philippe Sorrel, Gweltaz Maheo, Wang GuoCan, Xu Yadong, Cao Kai, Pierre-Olivier Antoine, Inès Eymard, Liu Wei, Lu Haijian, Anne Replumaz, Marie-Luce Chevalier, Zhang Kexin, Wu Jing, Shen Tianyi. 2017. Reappraisal of the Jianchuan Cenozoic basin stratigraphy and its implications on the SE Tibetan plateau evolution. *Tectonophysics*, 162~179.

Ma Hongjie. 2013. Cenozoic stratigraphy and paleoenvironmental changes in Hengduan Mountains, southwest China. Kunming: Kunming University of Science and Technology (in Chinese with English abstract), 1~183.

Qian Chongshu et al. 2004. Flora of China. Beijing: Science Press (in Chinese with English abstract).

Rowley D B, Currie B S. 2006. Paleo-altimetry of the Late Eocene

- to Miocene Lunpola basin, central Tibet. *Nature*, 439: 677~681.
- Sha Shaoli, Ao Deen. 2001. A study on the petrographic characteristics and eruption period of the Cenozoicvolacanic rock in Dali-Jianchuan area. *Yunnan Geology*, 20(4):361~368 (in Chinese with English abstract).
- Song Xiaoyan, Robert A. Spicer, Yang Jian, Yao Yifeng, Li Chengsen. 2010. Pollen evidence for an Eocene to Miocene elevation of central southern Tibet predating the rise of the High Himalaya. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 297(1):159~168.
- Sun Bainian, Wu Jingyu, Liu Yusheng, Ding Suting, Li Xiangchuan, Xie Sanping, Yan Defei, Lin Zhicheng. 2011. Reconstructing Neogene vegetation and climates to infer tectonic uplift in western Yunnan, China. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 304(3-4SD):328~336.
- Tang Yong. 2014. A Study on the Slip Rates of Longpan-Qiaohou Fault zone in late Quaternary. Beijing: Institute of Earthquake Science CEA (in Chinese with English abstract), 1~81.
- Wan Shaokai, Xia Bin, Zhang Yuquan. 2005. SHRIMP zircon U-Pb dating of Laojunshan syenite. *Geotectonica ET Metallogenia*, 29(5):522~526 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guocan, Cao Kai, Zhang Kexin, Wang An, Liu Chao, Meng Yanning, Xu Yadong. 2011. Spatio-temporal of tectonic uplift stages of the Tibetan Plateau in Cenozoic. *Science China-Earth Science*, 54(1):29~44.
- Wang Pujun, Wu Heyong, Pang Yanming, Men Guangtian, Ren Yanguang, Liu Wanzhu, Bian Weihua. 2006. Volcanic Facies of the Songliao Basin; Sequence, Model and the Quantitative Relationship with Porosity&Permeability of the Volcanic Reservoir. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 05:805~812 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yi, Zhang Kexin, Garzzone, Xu Yadong, Song Bowen, Ji Junliang. 2016. Low palaeoelevation of the northern Lhasa terrane during late Eocene;Fossil foraminifera and stable isotope evidence from the Gerze Basin. *Scientific Reports* 6: 27508, DOI:10.1038/srep27508.
- Xia Bin, Lin Qingcha, Zhang Yuquan. 2005. Zircon SHRMP dating of diopside granite in Ailaoshan-Jinshajiang rock belt and its geological mplications—example for Yuzhaokuai matouwan and Shilicun diopside granites. *Geotectonica ET Metallogenia*, 29(1):35~43 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yingchao, Tong Yabo, Wang Heng, Yang Zhenyu. 2017. Paleomagnetic Constrains on the Reversed S-shaped Structure Deformation of the Lanping-Simao Basin in the Southeastern Xizang(Tibet) Plateau. *Geological Review*, 03:549~567.
- Xu Zenlian. 2015. Oligocene-Miocene pollen records in Xunhua Basin, northeastern Tibetan Plateau and its implications for evolution of the East Asian monsoon. *Wuhan: China University of Geosciences* (in Chinese with English abstract), 1~109.
- Xu Zhiqin, Wang Qin, Li Zhonghai, Li Huaqi, Cai Zhihui, Liang Fenghua, Dong Hanwen, Cao Hui, Chen Xijie, Huang Xuemeng, Wu Chan, Xu Cuiping. 2016. Indo-Asian Collision; Tectonic Transition from Compression to Strike Slip. *ACTA GEOLOGICA SINICA*, 01:1~23.
- Yang Di, Wang Pujun, Liang Jianping, Tang Huafeng, Huang Yulong, Bao Li. 2011. Volcanic eruption cycles of the cretaceous YingCheng formation in the SongLiao basin. *Journal of Stratigraphy*, 02:122~128 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Cao Kai, Liu Chao, Xiang Shuyuan, Hong Hanlie, Kou Xiaohu, Xu Yadong, Chen Fenning, Meng Yanning, Chen Ruiming. 2008. Cenozoic sedimentary records and geochronological constraints of differential uplift of the Qinghai-Tibet Plateau. *Sciense in China Series D-earth Sciences*, 51(11):1658~1672.
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Luo Mansheng, Ji Junliang, Xu Yadong, Chen Ruiming, Chen Fenning, Song Bowen, Liang Yinping, Zhang Jianyu, Yang Yongfeng. 2010. Evolution of Tectonic Lithofacies Paleogeography of Cenozoic of Qinghai-Tibet Plateau and Its Response to Uplift of the Plateau. *Earth Science*, 35:697~712 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Hong Hanlie, Xu Yadong, Luo Mansheng, Ji Junliang, Song Bowen, Jiang Shangsong. 2011. Cretaceous debris, sedimentation and climate evolution of the Tibetan Plateau and its response to tectonic uplift. *Chinese Society of Paleontology*, 232~234 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Wang Guocan, Hong Hanlie, Xu Yadong, Wang An, Cao Kai, Luo Mansheng, Ji Junliang, Xiao Guoqiao, Lin Xiao. 2013. Research Status of Cenozoic Uplift in Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Bulletin of China*, 01:1~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Kexin, Pan Guitang, He Weihong, Xiao Qinghui, Xu Yadong, Zhang Zhiyong, Lu Songnian, Deng Jinfu, Feng Yimin, Li Jinyi, Zhao Xiaoming, Xing Guangfu, Wang Yonghe, Yin Fuguang, Hao Guojie, Zhang Changjie, Zhang Jin, Gong Yiming. 2015. New Division of Tectonic-Strata Superregion in China. *Earth Science*, 40(2):206~233 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Liansheng, Scharer Urs. 1999. Age and origin of magmatism along the Cenozoic Red River shear belt, China. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 134(1):67~85.

参 考 文 献

- 何科昭,何浩生,蔡红飘. 1996. 滇西造山带的形成与演化. *地质论评*, 02:97~106.
- 侯可军,李延河,田有荣. 2009. LA-MC-ICP-MS 锆石微区原位 U-Pb 定年技术. *矿床地质*, 04:481~492.
- 皇甫岗. 2009. 云南地震活动性研究. 安徽:中国科学技术大学, 1~184.
- 李鼎容,黄兴根,王安德,于慎懋. 1986. 滇西北区早第三纪海相灰岩的发现及其意义. *科学通报*, 292~296.
- 李勇. 2012. 滇西“三江”地区新生代钾质岩浆岩年代学特征、岩石成因及其地质意义. 北京:中国地质大学(北京), 1~110.
- 林清茶. 2007. 哀牢山—金沙江钾质碱性岩带地球化学特征及其构造意义. 广州:中国科学院广州地球化学研究所, 1~73.
- 刘璎,郑绵平,张震,于常青,苗忠英,张凯,高磊. 2017. 滇西南思茅盆地盐构造研究及找钾初探. *地质论评*, 03:568~580.
- 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. 昆明:昆明理工大学, 1~183.

钱崇澍等主编. 2004. 中国植物志. 北京:科学出版社.

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. 云南地质,20(4):361~368.

汤勇. 2014. 龙蟠—乔后断裂带晚第四纪活动速率研究. 北京:中国地震局地震预测研究所,1~81.

万哨凯,夏斌,张玉泉. 2005. 老君山正长岩锆石 SHRIMP 定年. 大地构造与成矿学,29(5):522~526.

王璞珺,吴河勇,庞颜明,门广田,任延广,刘万洙,边伟华. 2006. 松辽盆地火山岩相:相序、相模式与储层物性的定量关系. 吉林大学学报(地球科学版),05:805~812.

夏斌,林清茶,张玉泉. 2005. 哀牢山—金沙江带透辉石花岗岩锆石 SHRIMP U-Pb 年龄及地质意义——以玉召块、马头湾和十里村岩体为例. 大地构造与成矿学,29(1):35~43.

徐颖超,仝亚博,王恒,杨振宇. 2017. 青藏高原东南缘兰坪—思茅盆地反 S 型构造属性的古地磁约束. 地质论评,03:549~567.

徐增连. 2015. 青藏高原东北缘循化盆地渐新世—中新世孢粉记录与东亚季风演化. 武汉:中国地质大学(武汉),1~109.

许志琴,王勤,李忠海,李化启,蔡志慧,梁风华,董汉文,曹汇,陈希节,黄学猛,吴婵,许翠萍. 2016. 印度—亚洲碰撞:从挤压到走滑的构造转换. 地质学报,01:1~23.

杨帝,王璞珺,梁江平,唐华凤,黄玉龙,包丽. 2011. 松辽盆地白垩系营城组火山岩喷发旋回划分. 地层学杂志,02:122~128.

张克信,王国灿,骆满生,季军良,徐亚东,陈锐明,陈奋宁,宋博文,梁银平,张健钰,杨永锋. 2010. 青藏高原新生代构造岩相古地理演化及其对构造升降的响应. 地球科学,05:697~712.

张克信,王国灿,洪汉烈,徐亚东,骆满生,季军良,宋博文,江尚松. 2011. 青藏高原新生代岩石剥露、沉积与气候演化及其对构造升降的响应. 中国古生物学会学术年会,232~234.

张克信,王国灿,洪汉烈,徐亚东,王岸,曹凯,骆满生,季军良,肖国桥,林晓. 2013. 青藏高原新生代隆升研究现状. 地质通报,01:1~18.

张克信,潘桂棠,何卫红,肖庆辉,徐亚东,张智勇,陆松年,邓晋福,冯益民,李锦铁,赵小明,邢光福,王永和,尹福光,郝国杰,张长捷,张进,龚一鸣. 2015. 中国构造—地层大区划分新方案. 地球科学,40(2):206~233.

Geological Dating and Paleoenvironmental Research on Volcanic Events of the Jianchuan Formation in the Jianchuan Basin, Western Yunnan Province

QIN Qiong^{1,2)}, XU Yadong^{1,3,4)}, ZHANG Kexin^{1,3,5)}, WU Jing^{1,3)},
ZHENG Guodong¹⁾, CAO Kai¹⁾, WANG Guocan^{1,5)}, DAI Jie⁴⁾

1) School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China;

2) Geophysical and Geochemical Team, Non-ferrous Metals and Nuclear Industry Geological
Exploration Bureau of Guizhou Province, Duyun, Guizhou, 558000, China;

3) State Key Laboratory of Biological and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China;

4) Key Laboratory of Sedimentary Basin and Oil and Gas Resources, Ministry of Land and Resources,
Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu, 610081, China;

5) Geological Survey of China University of Geosciences, Wuhan, 430074, China

Abstract

U-Pb dating was carried out for zircons from top of the tuffaceous sandstone and bottom of tuffaceous volcanic breccia in the Jianchuan Formation. Combined with the age data of the granite veins within the Jianchuan Formation, the study constraints volcanic event within the ages of 36.23 ± 0.88 Ma to 35.46 ± 0.76 Ma, suggesting the Caijiachong stage of Late Eocene in time. A large number of palynomorphs found in the upper part of the section reflects that the margin of the Jianchuan basin was covered by evergreen-deciduous broad-leaved mixed forest in this period, which was distinctly characterized by the vertical zonation of vegetation. Combined with elevation, annual average temperature and annual precipitation recorded by the fossils which has closest relation with the palynomorphs, this study obtained the average annual temperature of $13.3-14.9^{\circ}\text{C}$, the average annual precipitation of the range of 863.3-1344 mm, and the paleoelevation of 1900 ± 100 m for the Jianchuan Basin during Late Eocene using the coexistence analysis of the main palynomorphs. Integrated comparison of paleontological data, oxygen isotope, volcanic event and tectonic thermo-data indicates that under the effect of collision of India and Eurasia plates during the Late Eocene, the western area of Yunnan shows the obvious difference in evaluation, with highest up to 2000~2700m and lowest down to 1200 m, even to sea level, accompanied by the formation of a series of pulling basins and volcanic events.

Key words: Jianchuan Basin in western Yunnan; volcanic cycle; zircon dating; palynomorphs; paleoenvironment