

doi: 10.12097/gbc.2023.02.050

青藏高原冈底斯岩浆岩带西段新近纪达若-壮拉火山构造的地层序列及活动时序重塑

尼玛次仁¹, 顿都^{1*}, 田杨杨¹, 洛桑朗杰¹, 尼玛扎西¹, 格桑卓嘎²
NYIMA Tstring¹, UUN Du^{1*}, TIAN Yangyang¹, LOBSANG Namgyal¹, NYIMA Tathy¹,
KHASANG Dolka²

1. 西藏自治区地质矿产勘查开发局区域地质调查大队, 西藏 堆龙德庆区 851400;

2. 西藏自治区地质矿产勘查开发局中心实验室, 西藏 拉萨 850000

1. Regional Geological Survey Party, Xizang Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Doilungdeqen 851400, Xizang, China;

2. Central Laboratory of Xizang Autonomous Region Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Lhasa 850000, Xizang, China

摘要: 青藏高原的新生代火山岩地层、岩相(岩石)与构造是高原演化过程的重要记录。针对青藏高原南部冈底斯岩浆岩带西段近南北向展布的达若-壮拉火山构造洼地内新近纪火山作用过程,在1:5万遥感解译和地质调查基础上,结合1:2000岩石地层剖面测制、锆石U-Pb同位素定年等方法开展了火山地层序列及活动时序重塑研究。结果发现,该新近纪火山活动包含了锆石U-Pb年龄分别为11 Ma、10 Ma的早、晚2期喷发沉积序列,其中早期火山活动以单纯中心式喷溢为主,伴有小规模爆发作用,形成了盾状熔岩穹隆或熔岩台地,火山喷发物主要为粗面安山岩、粗安质熔结凝灰岩和粗安质凝灰岩等;而晚期火山活动以侵出、侵入活动和小规模爆发作用为主,形成了熔岩和火山渣组成的火山锥,火山喷发物主要为粗安质熔结凝灰岩、粗安质凝灰岩、粗安质火山碎屑岩、玻基粗面斑岩等。该套新近纪火山序列的爆发指数整体较低,喷发方式属于斯特朗博利型或夏威夷型,空间上与区内的早期古近纪火山机构呈切割式、叠套式组合,反映新近纪与古近纪火山活动中心存在空间迁移特征。同时发现,该区火山作用时代与区域伸展构造的发育时间基本重叠,表明该区新近纪火山活动应形成于青藏高原碰撞后的陆内拉张环境,发育过程可能受到青藏高原晚新生代近东西向伸展作用控制,从而与区域上的近南北向裂谷系伴生。

关键词: 青藏高原;火山机构;钾质-超钾质火山岩;近南北向裂谷;地质调查工程;火山爆发指数

中图分类号: P534.62; P542.3⁶; P597^{.3} **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2024)07-1173-18

Nyima T, Uun D, Tian Y Y, Lobsang N, Nyima T, Khasang D. Neogene volcanic rock sequence and its reconstruction of Daruo-Zhuangla volcanoes in the western segment of Gangdise igneous rock belt, Xizang Plateau. *Geological Bulletin of China*, 2024, 43(7): 1173-1190

Abstract: The volcanic strata, lithofacies (rocks), and structures of the Cenozoic volcanoes in the Xizang Plateau are important records to decipher the evolution process of the plateau. In order to reconstruct the Neogene volcanism process in the Daruo-Zhuangla volcano-tectonic depression, a "three-facies geological survey" was carried out for the volcanic rocks in the study area using 1:50000 geological survey, 1:50000 remote sensing geological interpretation, 1:2000 lithostratigraphic section, zircon U-Pb isotope dating and other methods. It is found that the Neogene volcanic activities in the study area are characterized by early and late stages, in which the early volcanic activity is dominated by simple central-type eruption accompanied by small-scale eruption, forming a shield lava

收稿日期: 2023-02-23; 修订日期: 2023-06-06

资助项目: 中国地质调查局项目《冈底斯-喜马拉雅铜矿资源基地调查》(编号: DD20160015)

作者简介: 尼玛次仁(1973-), 男, 高级工程师, 从事矿产地质勘查及区域地质调查。E-mail: 1312401513@qq.com

* 通信作者: 顿都(1985-), 男, 高级工程师, 从事区域地质调查及地质灾害调查。E-mail: 308772904@qq.com

dome or lava platform, and the volcanic eruptions are trachyandesite, trachyandesitic ignimbrite, and trachyandesitic tufflava, etc; the late volcanic activity is dominated by small-scale eruption, invasion and intrusion, forming a volcanic cone composed of lava and volcanic cinder. The volcanic eruptions are trachyandesitic ignimbrite, trachyandesitic tufflava, trachyandesitic volcanoclastic and vitrophyric rocks. On the whole, the Neogene volcanic eruption index in the study area is low. The eruption style belongs to the Stromboli type or Hawaiian type. The distribution scale is small, and the spatial and Early Paleogene volcanic edifice are cross-cutting and stacked, which reflects the local migration characteristics of the volcanic activity center. New zircon U-Pb dating ages of the two stages of volcanic products are 11 Ma and 10 Ma, respectively. The ages of the rocks overlap with the development time of the regional extensional structure, indicating that the Neogene volcanic activity was formed in the intracontinental extensional environment after the collision of the Xizang Plateau, and its formation and distribution are controlled by the nearly N-S graben generated by the Late Cenozoic detachment and extension of the Xizang Plateau.

Key words: Xizang Plateau; volcanic apparatus; potassic-ultrapotassic volcanics; nearly N-S graben; geological survey engineering; volcanic eruption index

晚白垩世以来,印度板块的持续向北俯冲及与欧亚板块的强烈陆陆碰撞,造就了青藏高原南部近东西向展布的冈底斯岩浆岩带。该岩浆岩带也是高原南部的大型火山构造组合群体,其间分布着大量由北东向、北西向、近南北向断裂控制的火山喷发带。达若-壮拉火山构造洼地位于冈底斯岩浆岩带西段,毗邻区域上由近南北向断裂系控制的最大断陷盆地——当若雍错-许如错地堑,其主体由新生代陆相火山岩构成,其中包含了本次研究的新近纪钾质-超钾质火山岩系。

早期研究认为,青藏高原的新近纪钾质-超钾质火山岩主要集中于藏北地区,广泛分布于羌塘可可西里及昆仑山地区,其中以鱼鳞山组火山岩为代表(李光明等,2000;李才等,2002;黄勇等,2004)。在21世纪初开展的新一轮1:25万区域地质调查中,相继在藏南的仲巴地块和拉萨地块西部雄巴盆地发现了中新世钾质火山岩,并均将其划归为鱼鳞山组(张计东等,2015)。同期,成都理工大学在开展1:25万措勤县幅区域地质调查时,在拉萨地块西段扎布耶茶卡地区的布嘎寺一带发现了中新世钾质火山岩,并认为该套火山岩与羌塘地块中钾质火山岩的时代及岩性组合特征具相似性,但是考虑到地层分区的不同,将之建立了新的地层单元,并命名为布嘎寺组(刘登忠等,2015)。

拉萨地块内部的新近纪钾质-超钾质火山岩岩浆活动广受关注,前人对其研究主要集中于岩石地球化学和同位素的研究,分析火山岩浆的起源、岩石的成因、形成年代及构造环境等(马润则等,2002;莫宣学等,2003;石和等,2005;陈建林等,2006;丁林等,2006;刘栋等,2011;王保弟等,2011;张巨等,2011;

胡文洁等,2012;刘栋等,2013)。赵志丹等(2006)曾对拉萨地块中部当惹雍错-许如错火山构造洼地内发育的中新世超钾质火山岩开展同位素测年,并分析探讨了该区火山岩的成因、岩浆来源及对高原演化的意义等。但已有工作对于该期火山岩的地层岩序、火山岩相、火山机构、喷发方式及其形成过程等方面的研究仍然偏弱。笔者在实施西藏多普马地区1:5万区域地质调查过程中,在达若-壮拉火山构造洼地内发现并圈定了2个中新世火山机构,并针对该火山机构开展了详细的火山岩相调查及火山地层岩序剖面测制,并获得了该套火山序列的锆石U-Pb年龄。基于详实的野外调查资料,对达若-壮拉火山构造洼地内的新近纪火山岩的地层岩序、火山岩相及火山构造进行了恢复,并重塑该区新近纪火山活动过程,希望相关成果有助于更好地了解冈底斯西段新近纪火山序列的发育特征及其成因机制。

1 地质概况

达若-壮拉火山构造洼地位于冈底斯火山岩带西段,属拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带,北部为隆格尔-工布江达复合岛弧带,南侧为日喀则弧前盆地(潘桂棠等,2002)(图1)。火山构造洼地主体由古近纪钙碱性-高钾钙碱性火山岩系和新近纪钾质-超钾质火山岩系构成,区内大面积火山喷发活动及酸性岩浆侵入构成了研究区火山-侵入杂岩体系。

空间上,达若-壮拉火山岩火山构造洼地呈北北东向延伸,长61~73 km,宽25~36 km,面积约1784 km²。火山构造洼地基底为早二叠世昂杰组(P_{1a})的碎屑岩、碳酸盐岩系,主要见于区内强金火

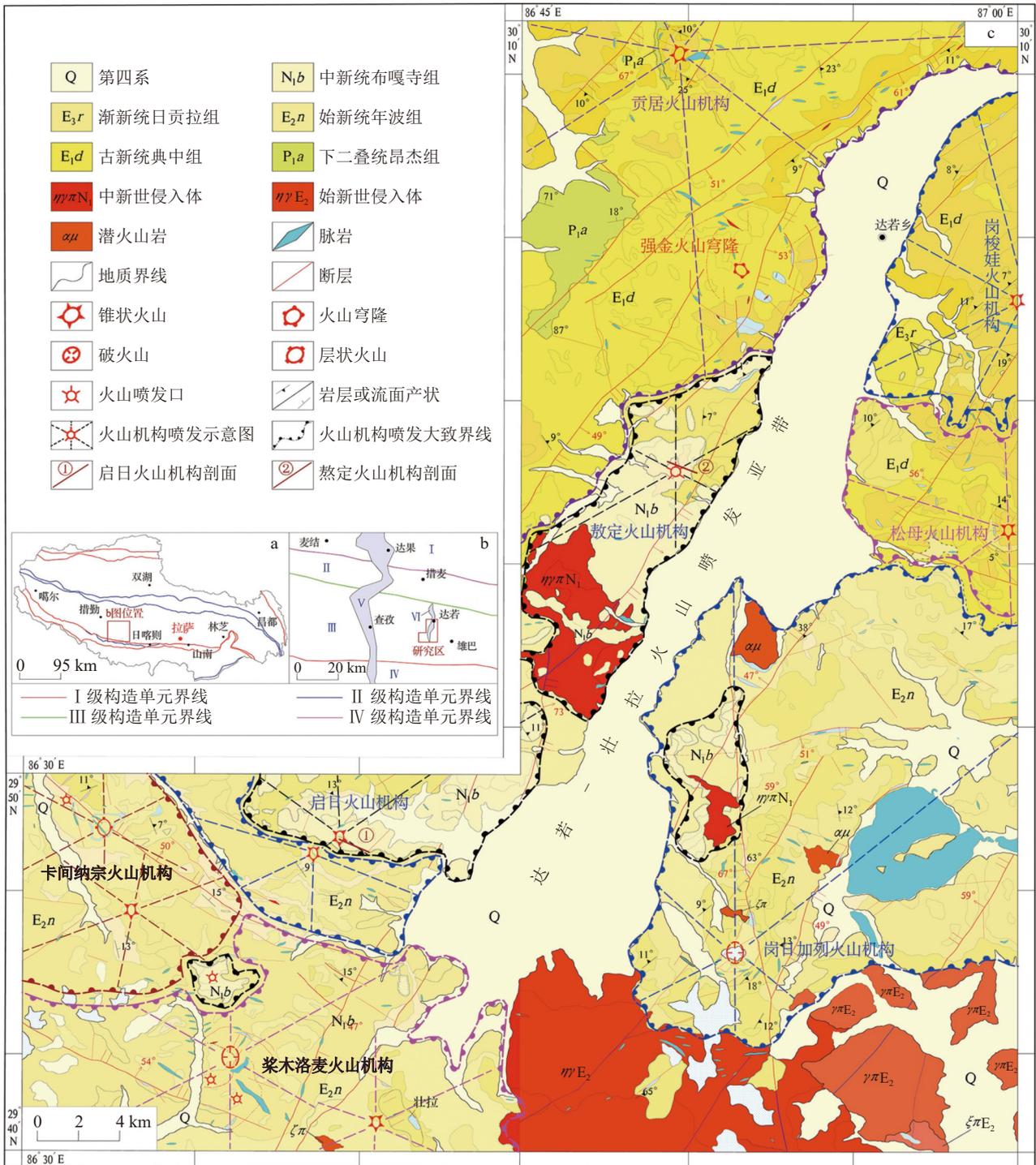


图 1 达若地区火山岩地质图

Fig. 1 The geological map of the Daruo volcanic area

a—西藏大地构造单元图; b—研究区位置图; c—研究区火山岩地质简图。I—达果白垩纪弧后盆地; II—隆格尔-工布江达断隆带; III—拉达克-冈底斯-下察隅岩浆弧带; IV—日喀则弧前盆地; V—当惹雍错-许如错地堑; VI—达若-壮拉地堑

山穹隆西侧(图 1)。由于岩浆向地表运移的垂直力顶起上覆岩层,使基底围岩被撕开裂解拆理伸展而剥露于地表,呈构造天窗出露。古生代基底地层(早二

叠世昂杰组)褶皱、逆断裂或推覆构造发育,区域应力状态为挤压性质。新生代火山岩不整合叠置在早二叠世昂杰组之上,岩石基本未受挤压构造影响。

研究区 11 座主火山及多个子火山簇立在北北东向火山洼地两侧,火山岩出露面积约 1600 km²。火山岩根据喷发时间可分为古新世典中组、始新世年波组、中新世布嘎寺组 3 个旋回。其中,早期古近纪(典中组、年波组)火山为该区火山岩的主体,火山岩受早期近东西向断裂和北西向、北东向断裂控制,火山活动以中心式喷发为主,局部见有中心-裂隙式喷发;晚期新近纪(布嘎寺组)火山受近南北走向基底断裂控制,主要分布于断陷谷地内,表现为中心式喷发。不同时间段频繁的火山活动构成了研究区类型繁杂的火山岩系。由于喷发方式、喷发强度、搬运堆积方式、古地貌、古气候等不同,形成的火山有破火山、火山锥、层火山、火山穹隆、盾火山等。不同火山之间或叠置、或切割、或镶嵌、或套叠,构成了复杂的火山构造格架。

达若-壮拉火山构造洼地内新近纪(布嘎寺组)火山圈定了 2 个主火山机构,即启日火山机构、熬定火山机构。火山机构呈北北东向线状排列,与区域晚期

构造方向一致。新近纪火山属中心式火山构造,火山机构中央部位构成火山锥、盾状岩穹或穹状岩脊等。

2 新近纪火山机构岩层层序特征

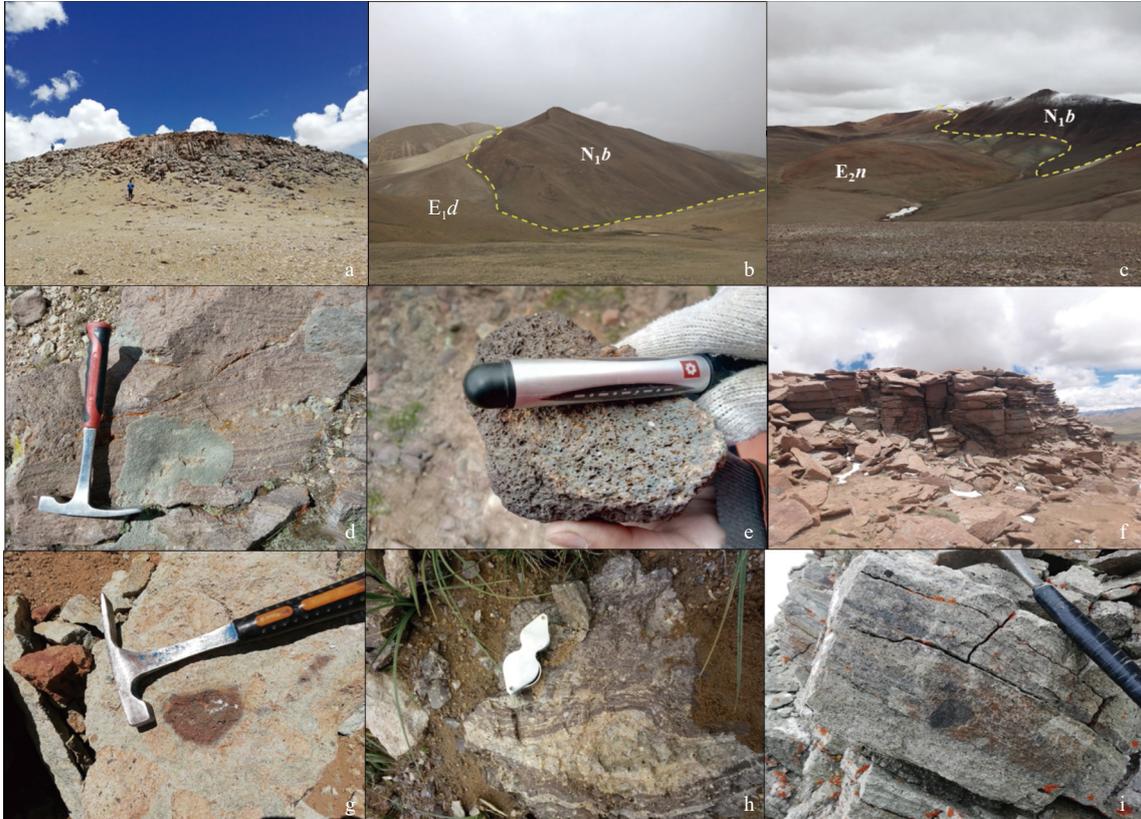
2.1 启日火山机构

启日火山机构位于达若-壮拉火山构造洼地南侧(图 1),区内见有典型的火山锥或盾状火山穹隆(图版 I-a)。火山主体由中新世布嘎寺组(N₁b)构成,其周围被始新世年波组(E₂n)火山旋回的蚀变英安质火山碎屑熔岩围绕,两者呈喷发不整合接触,顺接触带形成宽约十米至数百米的褪色蚀变圈(图版 I-c)。该区火山岩自火山通道侵出中心向前缘爆发碎屑堆积,岩层出露较全。因此,岩石地层剖面起点设置于古火山喷发中心,剖面起点坐标为:北纬 29°48'29"、东经 86°38'54"。剖面上布嘎寺组岩层堆积序列(图 2)描述如下。

⑧ 灰绿色玻基黑云母粗面斑岩(侵出相) 75.8 m

⑦ 灰色粗安质含角砾岩屑晶屑凝灰熔岩、灰色粗安质含集

图版 I Plate I



a. 启日火山机构盾状火山穹隆; b. 布嘎寺组(N₁b)与典中组(E₁d)喷发不整合接触关系(熬定火山喷发区); c. 布嘎寺组(N₁b)与年波组(E₂n)喷发不整合接触关系(启日火山喷发区); d~f 粗面安山岩及发育的流动构造、气孔构造、层状节理; g. 粗安质火山碎屑熔岩凝灰岩及其所含火山角砾和火山集块; h. 粗安质火山碎屑凝灰熔岩及塑性变形的浆屑; i. 喷发沉积相凝灰岩及发育的层理

块岩屑晶屑角砾凝灰熔岩、灰色粗安质含晶屑岩屑角砾凝灰岩、层状砂质凝灰岩、凝灰质砂岩(空落堆积相、喷发沉积相) 8.8 m

⑥ 灰绿色—灰白色气孔状黑云母粗面安山岩偶夹凝灰岩(喷溢相、涌流堆积相) 32.8 m

⑤ 灰白色强粘土化黑云母粗面安山岩(喷溢相) 57.8 m

④ 灰白色粘土化粗安质含角砾晶屑岩屑凝灰熔岩、灰白色粘土化粗安质含角砾晶屑岩屑熔结凝灰岩(碎屑流相) 29 m

③ 浅紫色黑云母粗面安山岩(喷溢相) 14.2 m

② 灰绿色石英黑云母粗面安山岩偶夹凝灰岩(喷溢相、涌流堆积相) 67.6 m

① 灰绿色—灰白色层状粗安质含砂砾凝灰岩、灰绿色—灰白色含砾凝灰质砂岩(喷发沉积相) 5.6 m

~~~~~喷发不整合~~~~~

下伏地层: 年波组 ( $E_2n$ ) 紫色英安质含角砾晶屑岩屑凝灰熔岩

启日火山先后经历了 2 次喷发, 形成由下而上

的 2 个岩石地层序列。其中下段( $N_1b'$ )是启日火山第一期喷发-溢流的产物, 剖面上由①②③④⑤⑥ 6 个岩性单元(冷却单元)构成, 形成由黑云母粗面安山岩(图版 I-d, e、图版 II-d)、粗安质火山碎屑凝灰熔岩(图版 I-h)、粗安质火山碎屑熔结凝灰岩(图版 I-g、图版 II-c)、层状粗安质含砂砾凝灰岩(图版 I-i、图版 II-a)、粗安质含砾凝灰质砂岩等组成的岩穹。其中底部的层状凝灰岩和凝灰质砂岩作为火山喷发-沉积作用前缘堆积体, 喷发不整合于始新世年波组之上(图版 I-c)。虽然该组各类岩石在古火山口东、西两侧的分布不完全对称(因喷发作用具有方向性的缘故), 但从总体上看, 整个下段岩石均分布在火山锥外圈, 地形相对较低的低洼地带。根据对岩层中凝灰岩、沉凝灰岩和熔岩夹层的测定, 岩层总体产状呈围斜内倾, 倾角  $4^\circ\sim 16^\circ$ ; 上段( $N_1b^2$ )是启日火山第二期喷发-侵出的产物, 剖面上由⑦⑧ 两个岩性单元(冷却单元)构成。形成由粗安质火山

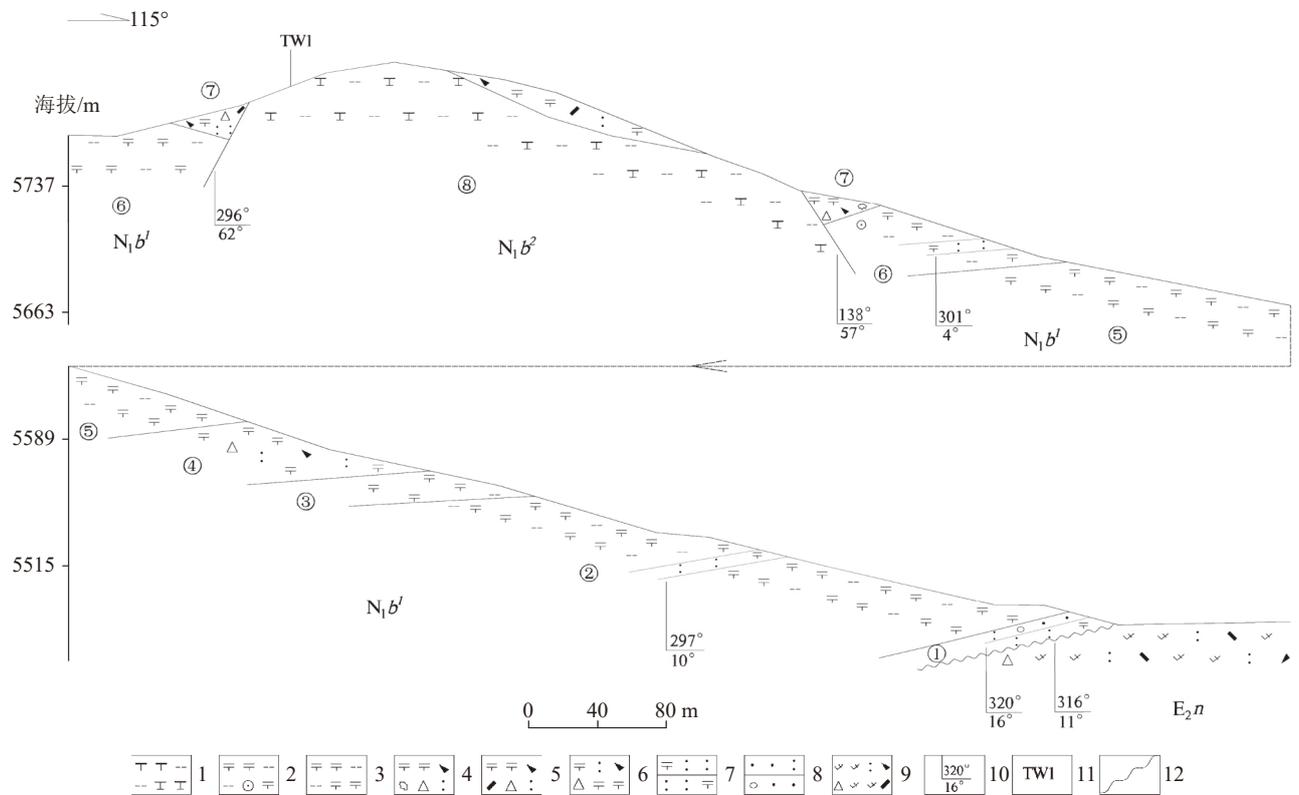
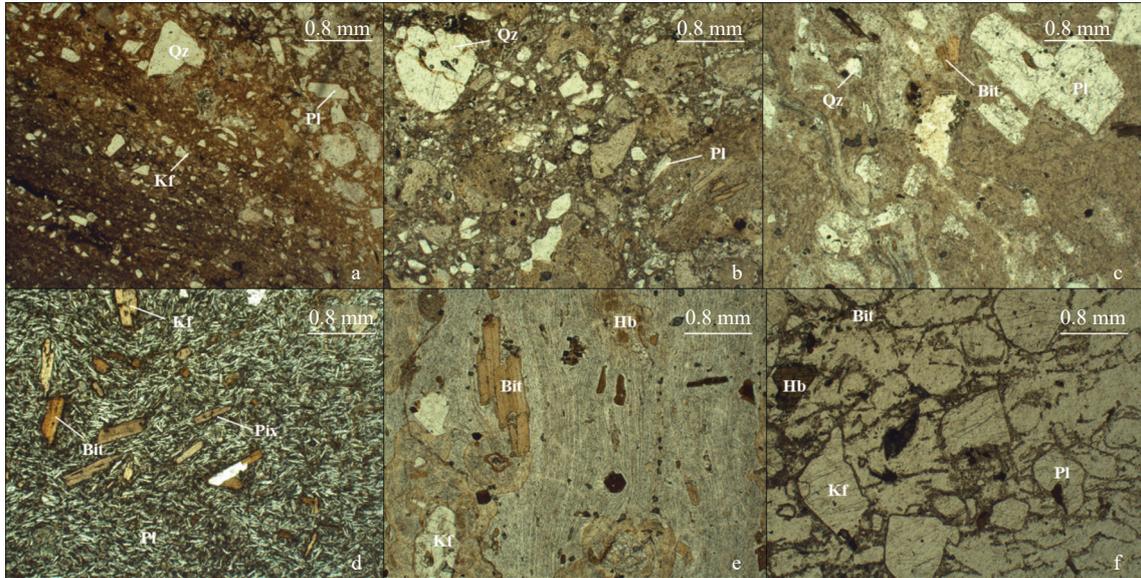


图 2 昂仁县启日火山机构中新世布嘎寺组实测地层剖面图

Fig. 2 The geological section of Miocene Bugasi Formation of Qiri volcanic apparatus in the Angren area

1—玻基黑云母粗面斑岩; 2—气孔状黑云母粗面安山岩; 3—黑云母粗面安山岩; 4—粗安质含角砾(偶含集块)岩屑凝灰熔岩; 5—粗安质含角砾岩屑晶屑凝灰熔岩; 6—粗安质含角砾岩屑凝灰熔岩; 7—粗安质凝灰岩; 8—含砾凝灰质砂岩; 9—英安质含角砾晶屑岩屑凝灰熔岩; 10—岩层产状; 11—同位素样品采样点; 12—喷发不整合界线;  $N_1b$ —中新世布嘎寺组( $N_1b'$  下段、 $N_1b^2$  上段);  $E_2n$ —始新世年波组

图版 II Plate II



a. 喷发沉积相含砂质晶屑凝灰岩; b. 爆发相粗安质晶屑岩屑角砾凝灰岩; c. 碎屑流相粗安质角砾晶屑熔结凝灰岩; d. 溢流相粗面安山岩; e. 火山通道相玻璃粗面斑岩; f. 次火山岩相粗面斑岩。Pl—斜长石; Kf—钾长石; Qz—石英; Bit—黑云母; Hb—角闪石; Prx—辉石

碎屑凝灰岩、粗安质火山碎屑熔结凝灰岩、粗安质火山碎屑凝灰岩(图版 II -b)、玻基粗面斑岩(图版 II -e)等组成的火山锥,底部见层状砂质凝灰岩,代表早晚火山喷发韵律之间存在间歇期,亦为布嘎寺组上下2段的标志层。火山锥体向东微倾斜,代表了火山通道或古火山喷发方向。

## 2.2 熬定火山机构

熬定火山机构位于达若-壮拉火山构造洼地北侧(图 1),区内见有典型的穹状熔岩台地。穹状火山主体由中新世布嘎寺组( $N_1b$ )构成,其北侧被古新世典中组( $E_1d$ )火山旋回的流纹质火山碎屑岩围绕,南侧被始新世年波组火山旋回的英安质火山碎屑熔岩围绕,均为喷发不整合接触关系。测制的地层剖面位于火山穹隆北侧的一处火山通道中心,剖面起点坐标为北纬  $29^{\circ}58'35''$ 、东经  $86^{\circ}49'52''$ 。剖面上布嘎寺组岩层堆积序列(图 3)描述如下。

- ⑤ 灰白色碎斑状粗面岩(火山通道相)
- ④ 灰绿色粗面安山岩(喷溢相) >75.0 m
- ③ 灰黑色气孔状粗面安山岩(喷溢相) 28.0 m
- ② 灰绿色粗面安山岩(喷溢相) 25.8 m
- ① 灰色粗安质强熔结火山角砾岩、灰色粗安质含角砾岩屑晶屑凝灰岩(碎屑流相) 25.2 m

~~~~~喷发不整合~~~~~

下伏地层: 典中组 (E_1d) 砖红色层状流纹质含砾凝灰岩、灰

白色—灰色含砾凝灰质砂岩、砖红色流纹质含角砾岩屑凝灰岩

熬定火山同样经历了2次喷发,形成上下2个岩石地层单位。其中下段(N_1b')是熬定火山第一期喷发-溢流的产物,剖面上由①②③④四个岩性单元(冷却单元)构成。形成主要由3个熔岩流和1个碎屑流组成的熔岩台地,其中底部碎屑流成因的熔结凝灰岩作为火山爆发作用前缘堆积体,喷发不整合于古新世典中组之上(图版 I -b),典中组顶层见有沉积成因的含砾凝灰质砂岩,代表古近纪和新近纪2个火山旋回的间歇期。根据对岩层冷却单元接触面的测定,岩层总体产状呈围斜内倾,倾角 $5^{\circ}\sim 12^{\circ}$;上段(N_1b^2)是熬定火山第二期侵入产物,剖面上由第⑤岩性单元(冷却单元)构成,形成一个熔岩充填的火山喷发口台地。该熔岩层与第一期溢流形成的粗面安山岩(围岩)呈侵入接触,侵入接触面内倾而呈喇叭口状(图 3)。

3 新近纪火山机构岩相组合及形成过程

3.1 启日火山穹隆

启日火山穹隆位于达若-壮拉火山构造洼地南侧,平面上以源地为基点呈椭圆形展布(图 4),剖面上呈短轴背斜状隆起。火山穹隆主体由中新世布嘎寺组构成,不整合覆盖于始新世年波组之上(图版 I -c),保存了较完整的火山机构。火山穹隆主峰海拔 5743 m,垂高约 340 m,底径 1850 m,坡角

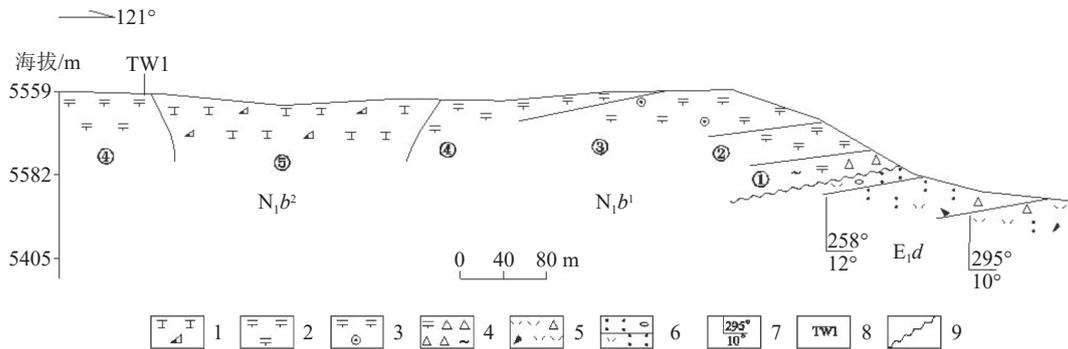


图 3 昂仁县熬定火山机构中新世布嘎寺组实测地层剖面图

Fig. 3 The geological section of Miocene Bugasi Formation of Aoding volcanic apparatus in the Angren area

1—碎斑状粗面岩; 2—粗面安山岩; 3—气孔状粗面安山岩; 4—粗安质强熔结角砾岩; 5—流纹质含火山角砾岩屑凝灰熔岩; 6—流纹质层状含砾凝灰岩; 7—地层产状; 8—同位素样品采样点; 9—喷发不整合界线; N_1b —中新世布嘎寺组(N_1b' 下段; N_1b^2 上段); E_1d —古新世典中组

为 $11^\circ\sim 22^\circ$, 发育放射状与环状断裂, 地貌上形成水系、沟谷。该火山机构内火山活动分为早晚 2 个韵律: 第一韵律主要表现为岩浆平静地从火口溢流或较低强度的火山爆发作用, 喷发物从火口中心向外依次形成喷溢相(涌流堆积相)—碎屑流相—喷发沉积相组合。不同岩相带依火山锥呈环状或半环状分布, 相互之间呈超叠关系(图 4)。第二韵律主要表现为低粘度的岩浆爆发或半凝固的岩浆从火口挤出充填火山通道, 喷发物在火口中心形成空落堆积相—中央侵出相、次火山岩相组合, 两者呈切割关系。启日火山各岩相特征及成因简述如下。

喷溢相: 构成了启日火山隆起的主体, 出露厚约 143.6 m, 约占整个火山机构出露面积的 90%。岩性为气孔状黑云母粗面安山岩、黑云母粗面安山岩、石英黑云母粗面安山岩等。不同的岩性组成一个独立的岩流单元, 而多期次的岩流超叠形成一个大熔岩被。在同一个岩流单元内局部夹有涌流堆积或火山灰空落堆积成因的粗安质凝灰岩, 凝灰岩基本有火山灰级碎屑构成, 呈薄层状, 单层厚 10~15 cm 之间, 代表了岩浆溢流过程中存在间歇性低能量的蒸汽岩浆爆发作用。喷溢相熔岩普遍发育流动构造(图版 I-d), 靠近火山口的熔岩顶层局部地段发育层状节理(图版 I-f)。

火山碎屑流相: 主要见于启日火山口东侧, 与火山通道倾伏方向或扇形舌状体堆积方向一致, 代表古火山喷发方向。岩层出露厚约 29 m, 呈半环形围绕喷溢相熔岩分布。主体岩性为粗安质含角砾岩屑晶屑凝灰熔岩, 局部过渡为熔结凝灰岩, 并见有火山弹。岩石具有火山碎屑岩和熔岩的双重特征, 整体

岩石普遍具强粘土化, 碎屑流熔岩顶部局部地段发育薄板状节理。

空落堆积相: 呈半环形发育于启日火山锥北侧或北东侧, 水平出露宽约 46 m, 厚约 8.8 m。组成岩性为粗安质岩屑晶屑角砾凝灰熔岩、粗安质含集块岩屑角砾凝灰熔岩和粗安质晶屑岩屑角砾凝灰岩, 分别属于溅落堆积和降落堆积成因, 底部见喷发沉积相的层状砂质凝灰岩和凝灰质砂岩。堆积体分相不明显, 碎屑物混杂, 分选性差, 一般下部较粗, 上部较细, 局部见有火山弹。近火口处堆积厚度大, 向远端迅速变薄。空落堆积相代表了早期火山锥遗迹, 被后期侵出相玻基黑云母粗面斑岩覆盖, 据此可以推测火口位置。

侵出相: 构成启日火山锥顶层, 充填了火口及火山通道, 地貌特征明显。主锥海拔 5743 m, 垂高 83 m, 火山锥底径 310 m, 锥体坡角为 18° 。岩性为玻基黑云母粗面斑岩, 其特征为: ①岩钟状形态, 锥体略向东侧方向倾伏, 顶部见有残留的早期空落堆积相粗安质火山碎屑熔结凝灰岩(图 2), 岩内俘虏有溢流相粗面安山岩角砾(图 5-b)。②粗面斑岩发育柱状节理(图 5-a), 与围岩(爆发相火山碎屑熔岩)呈“侵入接触”。③构成火山锥体的粗面斑岩从中心相到边缘相, 熔岩基质结构由微粒状晶质结构过渡为霏细质或玻质结构, 形成“三相一体”模式。

次火山岩相: 分布在火山机构的边缘及其邻近地区, 主要受环状断裂或放射状断裂制约, 只有个别次火山岩发育于区域北北东向断裂内。次火山岩呈脉状或岩株状侵入于各种不同的岩石中, 切割围岩地层, 呈陡倾斜的突变接触关系, 由于差异侵蚀, 地

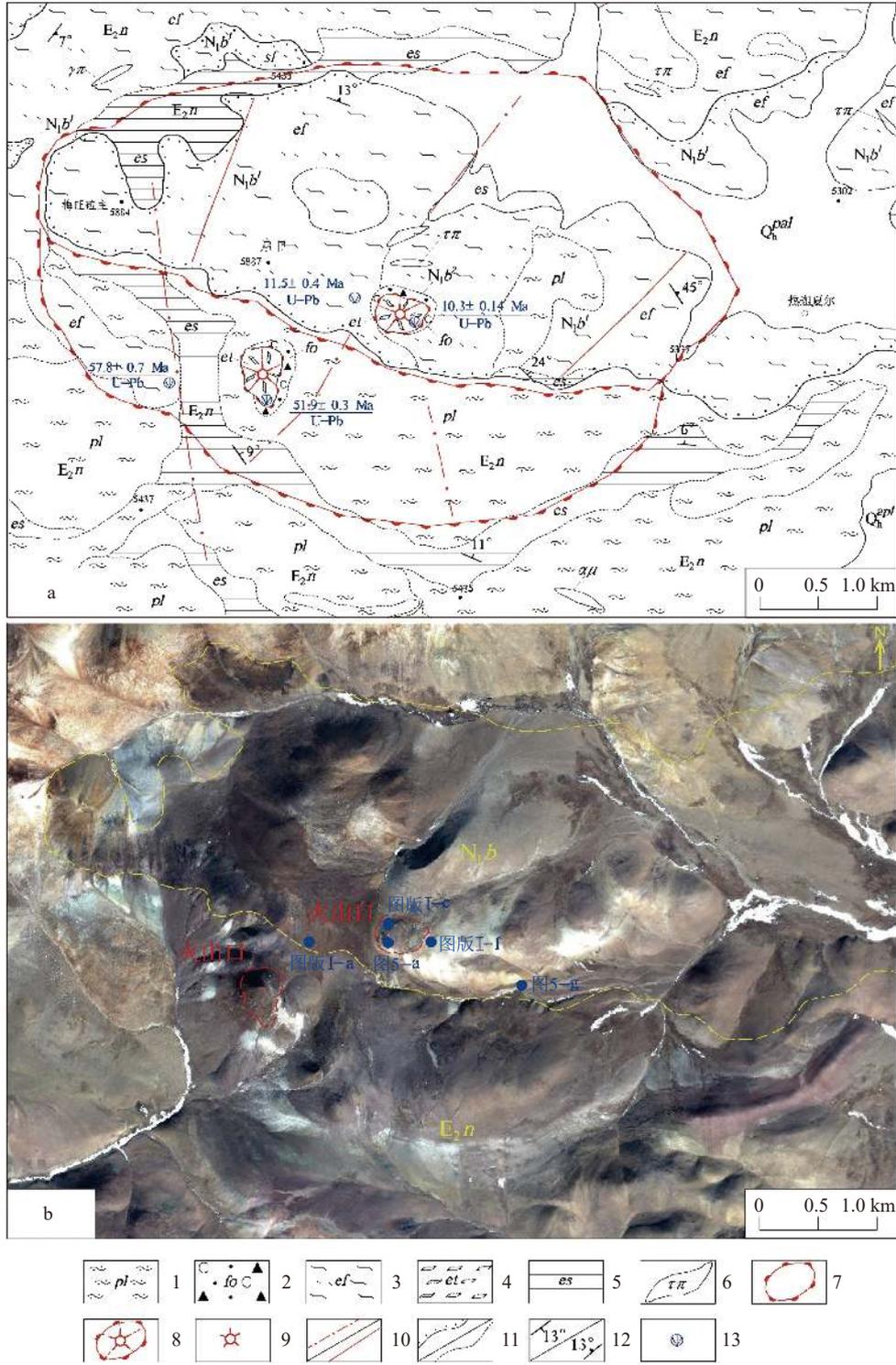


图4 启日火山穹隆火山构造-岩相图(a)和遥感影像图(b)

Fig. 4 The volcanic structures-lithofacies map (a) and remote sensing image (b) from the Qiri volcanic Dome
 Q_h^{pal} —第四系洪冲积物; N_1b' —中新世布嘎寺组(N_1b^1 第一韵律层、 N_1b^2 第二韵律层); E_2n —始新世年波组; 1—火山碎屑流相; 2—空落堆积相(降落、溅落); 3—喷溢相; 4—侵入相; 5—火山喷发沉积相; 6—次火山岩; 7—火山穹隆边界; 8—侵入岩穹; 9—火山口; 10—断裂(遥感解译断层、实测断层); 11—地质界线(喷发不整合界线、岩相界线); 12—产状(层理产状、流面产状); 13—同位素年龄采样点

貌上形成正凸起,与围岩界线截然(图 5-f)。岩性主要有粗面斑岩、安山玢岩、闪长玢岩、花岗斑岩等,岩石均为斑状结构。斑晶大小、基质的粒度和结构显示其结晶粒度较相应的熔岩高,出现较高频率的巨斑结构粗面岩,其中斑晶大者 $11\text{ mm}\times 22\text{ mm}\times 52\text{ mm}$ 。

喷发沉积相: 主要分布于启日火山锥南北两侧的地势低洼处,一般海拔标高为 5400~5520 m,出露厚约 5.7 m,主要岩性为层状粗安质含砂砾凝灰岩、含砾凝灰质砂岩,岩层向火口中心或向北东倾斜(图 5-g),倾角 $11^\circ\sim 16^\circ$ 。

从火山岩相分析启日火山机构形成过程及特点为: ①火山活动分为 2 个阶段,第一阶段中等粘度岩浆从火口溢出或喷出形成盾状岩穹;第二阶段早期低能量的岩浆爆发而溅落与降落交替进行,并以溅落为主,形成由浮岩块、火山渣等组成的火山锥。晚期岩浆从火口缓慢涌出,占居并充满整个火山口形成复式火山锥。②早晚 2 期火山喷发之间存在间歇期,有层状砂质凝灰岩、凝灰质砂岩等。③启日火山活动以中等粘度岩浆溢流为主,主要由粗面安山岩构成,其分布面积达 90%,厚度达 143.6 m。根据剖面上火山碎屑岩与熔岩厚度计算,火山爆发指数为 35,喷发方式属于斯特朗博利型,形成典型的穹状火山。④火山颈相或侵出相为粗面斑岩,为最晚期火山活动的产物,岩石具“三相一体”模式,形成典型的锥状火山。

3.2 熬定火山穹隆

熬定火山与启日火山毗邻,空间上位于达若-壮拉火山构造洼地北侧,平面上呈长条状,长约 10600 m,宽约 5850 m,垂厚约 340 m。该火山属于典型的喷溢-侵入穹隆,火山主体由布嘎寺组构成,北侧、西侧不整合覆盖在古新世典中组之上,南侧被稍晚期的二长花岗斑岩侵入,东侧被北北东向断裂肢解(图 1、图 6)。地形上南侧侵入岩表现为低地,北侧喷出岩则构成北北东走向的高山链,整体火山机构轮廓保存完整。区内岩浆活动自早到晚亦分为 2 个韵律: 第一韵律主要表现为中等粘度的岩浆从火口溢流和低强度的岩浆爆发作用,火山喷发物按先后次序呈不规则同心状掩盖,从外围向火口中心依次形成碎屑流相-溢流相组合;第二韵律主要表现为半凝固的岩浆在火山通道内侵位充填作用,火山物

质在喷发中心形成火山口-火山颈相-一次火山岩相组合。熬定火山机构岩相特征及成因简述如下。

喷溢相: 构成了熬定火山岩的主体,出露厚大于 128.8 m,约占整个火山机构出露面积的 57%。岩性为灰黑色气孔状粗面安山岩和灰绿色粗面安山岩,岩性单一无夹层。根据岩性及岩石组构不同,熔岩层分为 3 个独立的岩流单元,区域上整体岩流层围斜外倾,形成 1 个穹状熔岩台地,熔岩流前缘发育流面构造(图 5-d),流面整体由中心向外倾斜,一般倾角在 $13^\circ\sim 45^\circ$ 之间。剖面上靠近火口岩流层内倾,可能与岩浆房排空,上部的火山生成物失去下伏火山物质的支撑,使火口中心喷发物发生整体沉降。

火山碎屑流相: 见于熬定火山口东侧,属于早期火山喷发前缘碎屑流堆积体,出露规模小,岩层厚约 25.2 m,喷发不整合于古新世典中组流纹质火山碎屑岩之上(图 3)。主体岩性为粗安质强熔结晶岩、粗安质强熔结含角砾凝灰岩、粗安质含角砾岩凝灰岩熔岩等。

火山口-火山颈相: 熬定古火山机构经剥蚀之后火山管道上部火口已经破坏,而充填于火山管道及上部火山口地带的火山碎屑岩与熔岩较完整地保存着。火山口-火山颈相由粗面斑岩、粗安质晶屑岩屑凝灰岩、粗安质强熔结晶岩屑凝灰岩等组成,构成具有环带状或半环状结构的相。空间上火山物质分布具有不对称性,火山碎屑熔岩和强熔结凝灰岩集中分布于火口西侧(图 6),岩性界面向火山口中心(向东)倾斜;粗面斑岩位于火山口东侧,地貌呈低凹地形的熔岩台地,代表遭受了一定的侵蚀。粗面斑岩局部出现碎斑或伟晶状斑块(图 5-c),斑块为长石,其中大粒者 $17\text{ mm}\times 39\text{ mm}\times 63\text{ mm}$ 。剖面上粗面斑岩与围岩界面呈微向西倾斜的上宽下窄的喇叭状,代表了火山管道向深部逐渐缩小趋势,而火山通道整体倾伏方向与地表火山喷发物不对称分布特征相对应,显示古火山的总体喷发方向。

侵入相: 位于熬定火山机构南侧,为该火山穹隆的主体组成部分,约占整个火山机构出露面积的 38% 左右,岩性为二长花岗斑岩(图 5-e)。同位素年龄为 $10.3\pm 0.13\text{ Ma}$ (U-Pb),与溢流相的熔岩($11\pm 0.2\text{ Ma}$, U-Pb)有一定的时间间隔。其形成于火山岩浆活动的晚期,当主火山通道被堵塞之后,火山失去了喷发能力,残余岩浆沿构造侵位一定的深度冷凝结

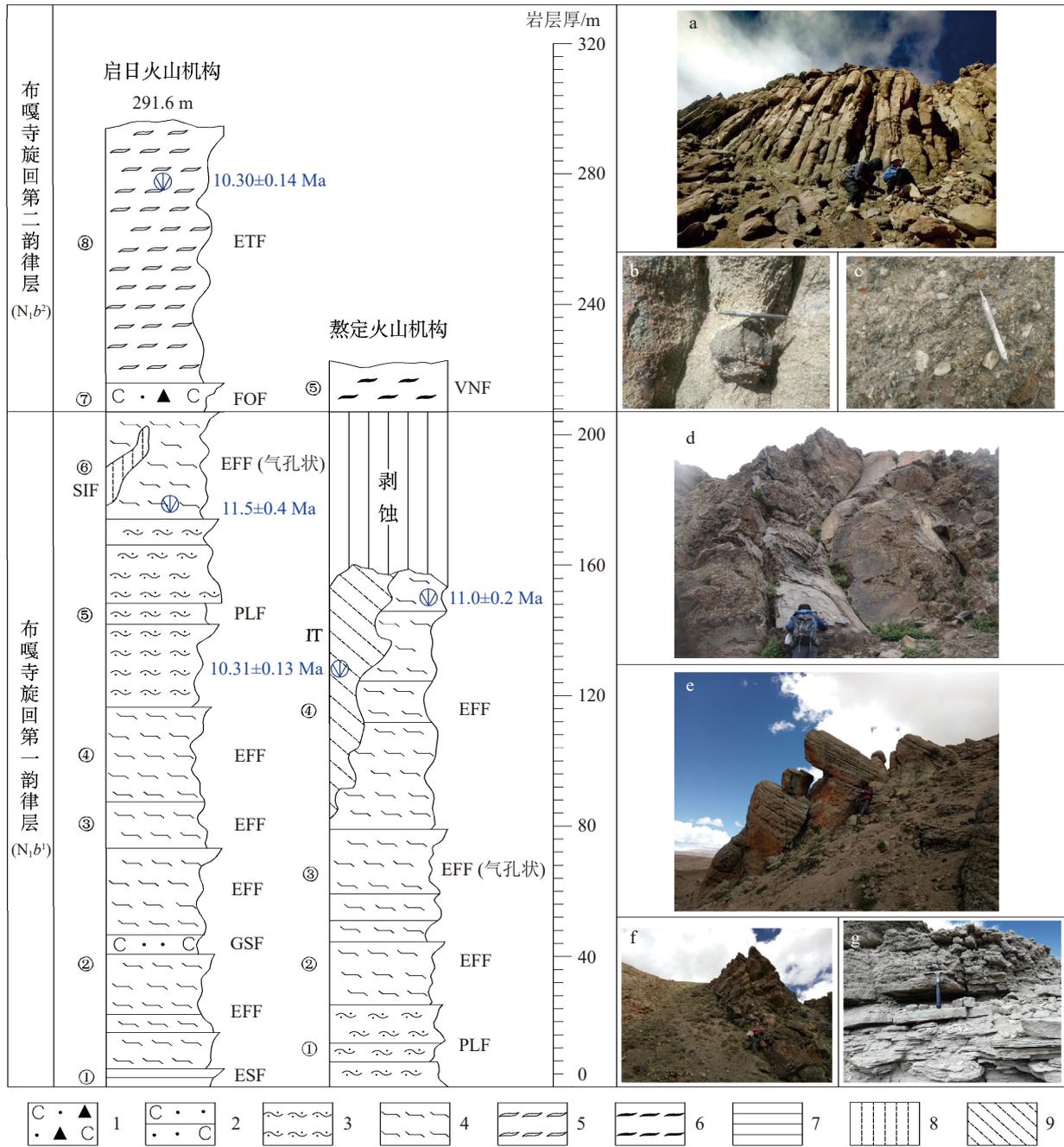


图5 达若-壮拉火山构造洼地新近纪火山岩相柱状对比图及火山岩照片

Fig. 5 The stratigraphic column of the Neogene Bugasi volcanic rocks in the the Daruo-Zhuangla volcano-tectonic depression
 1—(FOF)空落(溅落)堆积相; 2—(GSF)涌流相; 3—(PLF)火山碎屑流相; 4—(EFF)喷溢相; 5—(ETF)侵入相; 6—(VNF)火山颈相; 7—(ESF)火山喷发沉积相; 8—(SIF)次火山岩相; 9—(IT)侵入岩相。a—侵入相玻基面斑岩(发育柱状节理); b—侵入相玻基面斑岩中的粗面安山岩俘虏体; c—火山颈相巨斑状粗面斑岩; d—溢流相粗面安山岩中流面构造; e—侵入相二长花岗斑岩; f—次火山岩相安山玢岩; g—喷发沉积相层状粗安质含砂砾凝灰岩和含砾凝灰质砂岩

晶呈侵入岩相。与火山通道相的粗面斑岩属于同期产物,但是,该岩相在构造位置、成岩条件、岩石组构特征等均不同于火山颈相和次火山岩相。

从火山岩相分析熬定火山机构形成过程及特点为:①火山活动分为2个阶段,第一阶段早期火山喷发强度较高,形成底部碎屑流堆积层,喷发不整合堆

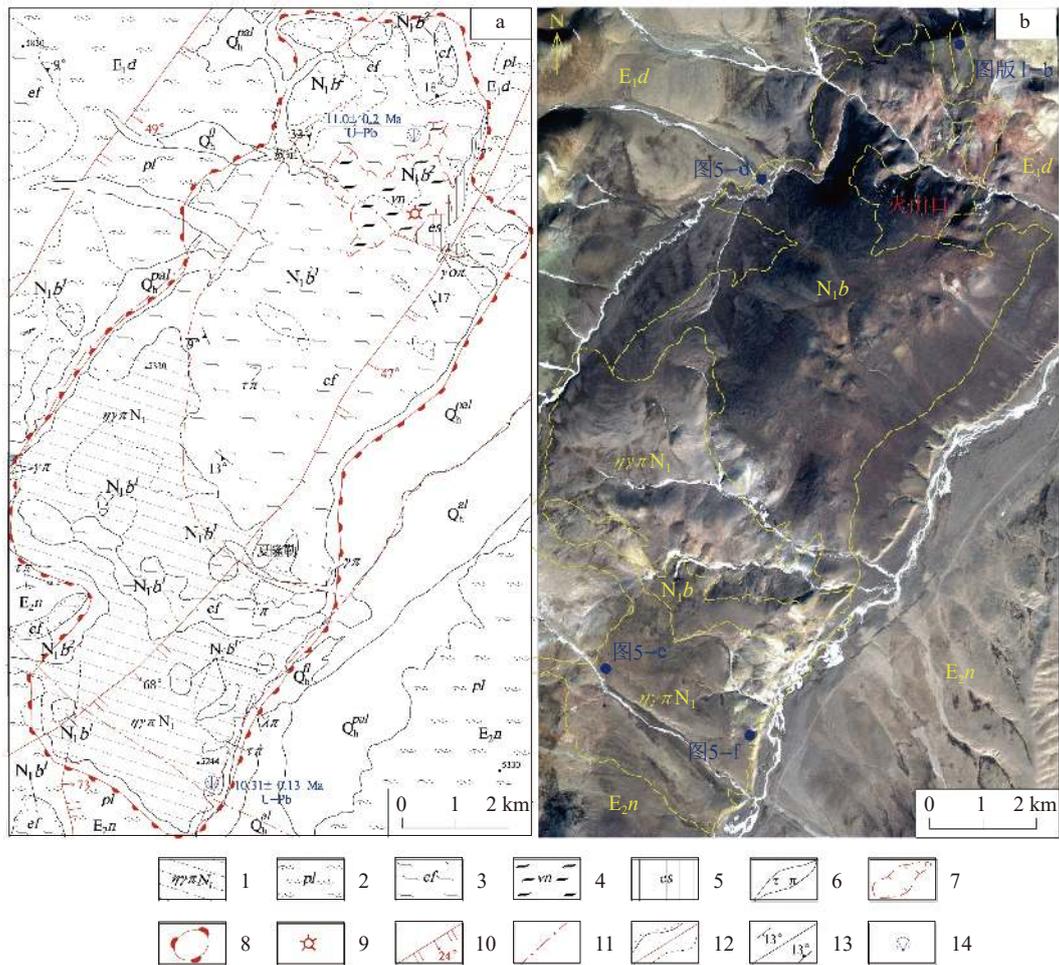


图 6 熬定穹状熔岩台地火山构造-岩相图(a)和遥感影像图(b)

Fig. 6 The volcanic structures-lithofacies map(a) and remote sensing image(b) from the Aoding dome-shaped lava platform
 Q₄—第四系松散堆积物(pal 为洪冲积物、al 为冲积物、fl 为沼泽堆积物); N₁b—中新世布嘎寺组(N₁b¹ 第一韵律层、N₁b² 第二韵律层);
 E₁d—古新世典中组; E₂n—始新世年波组; 1—侵入岩相(二长花岗斑岩); 2—火山碎屑流相; 3—溢流相; 4—火山颈相; 5—火山喷发
 沉积相; 6—一次火山岩; 7—火山通道; 8—火山穹隆边界; 9—推测火山口; 10—正断层; 11—遥感解译断层; 12—地质界线(喷发
 不整合界线、岩相界线); 13—产状(层理产状、流面产状); 14—同位素年龄采样点

积于基底古新世典中组之上, 晚期火山喷发强度降低, 大量的中等粘度岩浆从火山口溢出叠置覆盖早期碎屑流, 形成穹状熔岩台地; 第二阶段岩浆失去喷发能力, 在火山口中心充填火山通道形成火山颈相熔岩台地, 远离火山口岩浆沿构造侵入形成侵入岩穹, 最终形成保存较好的穹状火山机构。②根据同位素测定年龄早晚 2 个阶段火山活动之间有间歇期, 早期喷发溢流阶段为 $11 \pm 0.2 \text{ Ma}$ (U-Pb); 晚期侵入阶段为 $10.3 \pm 0.13 \text{ Ma}$ (U-Pb)。③熬定火山活动以岩浆溢流和侵位为主, 两者分布面积约占整个火山机构出露面积的 95%。根据剖面上火山碎屑岩与熔岩厚度来计算, 火山爆发指数小于 10, 喷发方式属于

夏威夷型。

4 新近纪火山活动时序重塑

4.1 新近纪火山活动空间时序特征

新近纪火山呈串珠状分布于达若-壮拉南北向地堑西侧, 其中启日火山机构内早期火山旋回(年波组)和晚期火山旋回(布嘎寺组)的火山口沿北东方向有 1.2~1.3 km 的迁移, 形成的环形构造呈切割关系, 火山岩层之间呈超覆、叠置关系, 因此认为该火山喷发小区内整体上火山构造形成切割式组合(图 4); 熬定火山机构由 3 个火山旋回(典中组、年波组、布嘎寺组)形成了叠套式组合, 晚期火山旋回(布嘎寺组)南北两侧分别叠置于早期火山旋回(典中

组、年波组)之上(图 6)。布嘎寺组火山旋回中,分别在 2 个主火山机构内根据喷发物物质组成、成分演化规律、空间分布特征、上下叠置关系等,将火山活动时序划分为 2 个韵律层。而在同一个韵律层内根据火山喷发类型及岩性组合特征划分了多个岩相单元(岩性柱),每个岩相单元(岩性柱)概括了该火山机构的火山活动时序特征(图 5)。

达若-壮拉火山岩火山构造洼地内 2 个主火山机构之间无直接接触,因此野外无法通过火山机构之间的空间叠置关系建立时序,但是两者在火山喷发方式、物质组成、岩浆演化规律、火山活动时间等方面具一定共性:①两者火山爆发强度均较低,火山喷发物分布规模小,喷发方式属于能量较低的夏威夷型或斯特朗博利型。②火山活动方式基本一致,早期以溢流为主,期间间歇性出现小规模的喷发活动,晚期表现为小规模的喷发和侵入或侵入活动,其中以火山活动末期的侵入或侵入活动为主。③岩浆演化、物质组成基本一致,早期火山活动形成粗面安山岩或粗面安山岩质火山碎屑熔岩,晚期火山活动主要形成粗面斑岩类或二长花岗斑岩。整体上岩浆早期到晚期由中性向酸性演化。④火山活动时间较接近,启日火山获取同位素年龄约为 10 Ma;熬定火山机构为 11~10 Ma。基于上述共性,认为达若-壮拉火山构造洼地内新近纪 2 个主火山机构为同时喷发活动的产物。

4.2 同位素年龄

本次分别对 2 个火山机构内早晚不同阶段形成的部分岩石进行了锆石 U-Pb 定年。锆石按常规方法分选获得锆石精矿,并在双目镜下挑选出用于测年的锆石,将其粘贴在环氧树脂靶上,经过打磨抛光使锆石中心部位出露,进行透射光、反射光和阴极发光(CL)显微照相(图 7)。锆石 U-Pb 同位素定年在廊坊市诚信地质服务有限公司完成,测试仪器为 Neptune Plus 高分辨多接受 ICP-MS、NWR193 准分子激光剥蚀进样系统。

U-Pb 同位素定年中,采用锆石标准 91500 作外标进行同位素分馏校正,每分析 5 个样品点,分析 2 次标样 91500。对于与分析时间有关的 U-Th-Pb 同位素比值漂移,利用标样的变化采用线性内插的方式进行了校正(Liu et al.,2010)。锆石标样 91500 的 U-Th-Pb 同位素比值推荐值据 Wiedenbeck et al.,(1995)。锆石 U-Pb 谐和图绘制和年龄加权平均计

算使用 Isoplot/Ex-ver3(Ludwig et al.,2003)程序完成。单次测定数据点的误差为 1σ ,普通铅根据实测²⁰⁴Pb 校正,年龄值选用 ²⁰⁶Pb/²³⁸U 年龄,其加权平均值具有 95% 的置信度。分析结果见表 1。

早期火山活动年龄:选择熬定火山机构内第一阶段火山喷发形成的火山熔岩进行锆石 U-Pb 定年。样品 PM005-TW1 采自熬定火山机构火口西侧溢流相粗面安山岩(图 6)。本次共测试了该样品 20 个颗粒,其中 17 个颗粒的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄较集中,他们的年龄加权平均值为 11 ± 0.2 Ma(图 7-c),该年龄可代表熬定火山机构早期火山活动的时间。

晚期火山活动年龄:分别在启日火山机构和熬定火山机构内,选择第二阶段火山活动形成的侵入相和侵入相火山岩进行锆石 U-Pb 定年。样品 PM017-TW1 采自启日火山机构火山通道内侵入相的玻基粗面斑岩(图 4),本次共测试了 20 个颗粒,其中 15 个颗粒的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄较集中,年龄加权平均值为 10.30 ± 0.14 Ma(图 7-a),该年龄可代表启日火山机构晚期火山活动的时间;样品 2917TW1 采自熬定火山机构南侧侵入相二长花岗斑岩(图 6),本次共测试了 20 个颗粒,20 个颗粒的²⁰⁶Pb/²³⁸U 表面年龄均较集中,年龄加权平均值为 10.31 ± 0.13 Ma(图 7-b),该年龄可代表熬定火山机构晚期火山活动的时间。

5 讨论

5.1 冈底斯岩浆岩带西段的新近纪火山活动方式及特征

冈底斯岩浆岩带属近东西向区域断裂控制的火山喷发带(I 级火山构造单元),是青藏高原大型的火山构造组合群体。研究区所处的达若-壮拉火山构造洼地位于冈底斯西段,属近南北向裂谷控制的火山喷发亚带(II 级火山构造单元)。达若火山岩区为区域上重要的火山圣地,火山岩分布面积约 1600 km²,由古近纪钙碱性-高钾钙碱性火山岩系(典中旋回、年波旋回)和新近纪钾质-超钾质火山岩系(布嘎寺旋回)组成,为多次、多中心喷发的火山喷出物叠加而成的火山岩台地。其中新近纪火山旋回主要分为早、晚 2 期,早期火山喷发方式表现为喷溢+爆发组合,形成由粗面安山岩和粗安质凝灰熔岩组成的火山穹隆或粗面安山岩组成的熔岩台地;晚期火山喷发方式表现为爆发+侵入(侵入)组合,形成由粗

表 1 火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Th-Pb 同位素数据

Table 1 LA-ICP-MS zircon U-Th-Pb isotopic data from the volcanic rocks

| 样品及测点 | 含量/ 10^{-6} | | Th/U | 同位素比值 | | | | | | 年龄/Ma | |
|--------------|---------------|--------|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| | Th | U | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ |
| PM017-TW1-1 | 1393.7 | 1435.6 | 0.97 | 0.04851 | 0.00229 | 0.01047 | 0.00047 | 0.00156 | 0.00003 | 10.1 | 0.17 |
| PM017-TW1-2 | 1039.7 | 677.1 | 1.54 | 0.04803 | 0.00289 | 0.0103 | 0.00059 | 0.00159 | 0.00003 | 10.2 | 0.22 |
| PM017-TW1-3 | 496.0 | 381.7 | 1.30 | 0.05242 | 0.00383 | 0.01156 | 0.00079 | 0.0016 | 0.00004 | 10.3 | 0.28 |
| PM017-TW1-4 | 605.8 | 1629.9 | 0.37 | 0.04558 | 0.00194 | 0.01057 | 0.00043 | 0.00166 | 0.00003 | 10.7 | 0.16 |
| PM017-TW1-5 | 761.1 | 674.0 | 1.13 | 0.04867 | 0.0027 | 0.01074 | 0.00056 | 0.00161 | 0.00003 | 10.3 | 0.2 |
| PM017-TW1-6 | 2019.6 | 852.3 | 2.37 | 0.04887 | 0.005 | 10100 | 0.00099 | 0.00152 | 0.00005 | 9.8 | 0.32 |
| PM017-TW1-7 | 1253.8 | 1028.2 | 1.22 | 0.05301 | 0.00282 | 0.01131 | 0.00057 | 0.00153 | 0.00003 | 9.9 | 0.19 |
| PM17-TW1-8 | 862.4 | 760.4 | 1.13 | 0.06064 | 0.00333 | 0.01301 | 0.00067 | 0.00156 | 0.00003 | 10.1 | 0.21 |
| PM017-TW1-9 | 1054.9 | 2337.4 | 0.45 | 0.04969 | 0.00231 | 0.0108 | 0.00048 | 0.00153 | 0.00003 | 9.9 | 0.16 |
| PM017-TWI-10 | 482.4 | 292.4 | 1.65 | 0.04874 | 0.00441 | 0.01146 | 0.00098 | 0.00174 | 0.00005 | 11.2 | 0.35 |
| PM017-TW1-11 | 843.2 | 1052.9 | 0.80 | 0.04351 | 0.00251 | 0.00995 | 0.00055 | 0.00162 | 0.00003 | 10.4 | 0.2 |
| PM017-TWI-12 | 851.6 | 567.7 | 1.50 | 0.0479 | 0.00422 | 0.01033 | 0.00086 | 0.00156 | 0.00005 | 10 | 0.3 |
| PM017-TW1-13 | 1228.1 | 1183.8 | 1.04 | 0.0503 | 0.0023 | 0.01095 | 0.00047 | 0.00161 | 0.00003 | 10.3 | 0.17 |
| PM017-TW1-14 | 654.6 | 1798.1 | 0.36 | 0.04515 | 0.00191 | 0.01118 | 0.00045 | 0.00177 | 0.00003 | 11.4 | 0.17 |
| PM017-TW1-15 | 1076.8 | 860.7 | 1.25 | 0.04752 | 0.00263 | 0.01065 | 0.00056 | 0.00164 | 0.00003 | 10.5 | 0.2 |
| PM017-TW1-16 | 898.8 | 811.1 | 1.11 | 0.0642 | 0.00258 | 0.01466 | 0.00055 | 0.00168 | 0.00003 | 10.8 | 0.18 |
| PM017-TW1-17 | 506.9 | 390.0 | 1.30 | 0.05064 | 0.00379 | 0.01091 | 0.00076 | 0.00158 | 0.00005 | 10.2 | 0.3 |
| PM017-TW1-18 | 1015.5 | 1365.7 | 0.74 | 0.04443 | 0.00228 | 0.01011 | 0.0005 | 0.00164 | 0.00003 | 10.5 | 0.17 |
| PM017-TW1-19 | 1049.8 | 764.8 | 1.37 | 0.05234 | 0.00282 | 0.01112 | 0.00056 | 0.00156 | 0.00003 | 10.1 | 0.2 |
| PM017-TW1-20 | 1100.6 | 1188.3 | 0.93 | 0.04102 | 0.00301 | 0.00896 | 0.00064 | 0.00159 | 0.00003 | 10.3 | 0.2 |
| 2917-TW1-1 | 1191.5 | 1067.2 | 1.12 | 0.05242 | 0.0022 | 0.01174 | 0.00046 | 0.0016 | 0.00003 | 10.3 | 0.17 |
| 2917-TW1-2 | 444.0 | 997.2 | 0.45 | 0.05003 | 0.0051 | 0.01053 | 0.00103 | 0.00154 | 0.00005 | 9.9 | 0.3 |
| 2917-TW1-3 | 853.7 | 845.8 | 1.01 | 0.05082 | 0.00338 | 0.01102 | 0.00069 | 0.00157 | 0.00004 | 10.1 | 0.24 |
| 2917-TW1-4 | 1232.3 | 2809.1 | 0.44 | 0.04733 | 0.0017 | 0.01066 | 0.00036 | 0.00155 | 0.00002 | 10 | 0.14 |
| 2917-TW1-5 | 757.4 | 948.0 | 0.80 | 0.04963 | 0.0037 | 0.01046 | 0.00074 | 0.00154 | 0.00004 | 66 | 0.25 |
| 2917-TW1-6 | 1201.3 | 2145.9 | 0.56 | 0.045 | 0.00237 | 0.01011 | 0.00051 | 0.0016 | 0.00003 | 10.3 | 0.17 |
| 2917-TW1-7 | 456.4 | 371.3 | 1.23 | 0.04957 | 0.00509 | 0.01086 | 0.00105 | 0.00166 | 0.00006 | 10.7 | 0.39 |
| 2917-TW1-8 | 833.7 | 1236.6 | 0.67 | 0.04583 | 0.0031 | 0.01047 | 0.00068 | 0.00165 | 0.00004 | 10.6 | 0.23 |
| 2917-TW1-9 | 1056.6 | 3024.0 | 0.35 | 0.04627 | 0.00173 | 0.01059 | 0.00038 | 0.00159 | 0.00002 | 10.2 | 0.14 |
| 2917-TW1-10 | 515.3 | 489.9 | 1.05 | 0.04618 | 0.00423 | 0.00995 | 0.00087 | 0.00159 | 0.00004 | 10.3 | 0.29 |
| 2917-TW1-11 | 1453.0 | 980.3 | 1.48 | 0.04119 | 0.00428 | 0.00936 | 0.00094 | 0.00161 | 0.00005 | 10.4 | 0.29 |
| 2917-TW1-12 | 979.0 | 5118.9 | 0.19 | 0.04783 | 0.00161 | 0.01073 | 0.00034 | 0.00169 | 0.00002 | 10.9 | 0.14 |
| 2917-TW1-13 | 702.0 | 1103.8 | 0.64 | 0.04706 | 0.00276 | 0.01005 | 0.00056 | 0.00155 | 0.00003 | 10 | 0.19 |
| 2917-TW1-14 | 499.0 | 1766.9 | 0.28 | 0.04415 | 0.00246 | 0.01022 | 0.00054 | 0.00165 | 0.00003 | 10.6 | 0.2 |
| 2917-TW1-15 | 586.7 | 438.0 | 1.34 | 0.0493 | 0.00456 | 0.01045 | 0.0009 | 0.00155 | 0.00005 | 10 | 0.35 |
| 2917-TW1-16 | 1167.3 | 886.6 | 1.32 | 0.04141 | 0.00307 | 0.009 | 0.00065 | 0.00158 | 0.00003 | 10.1 | 0.21 |
| 2917-TW1-17 | 395.1 | 528.5 | 0.75 | 0.056 | 0.00745 | 0.0118 | 0.00147 | 0.00154 | 0.00008 | 9.9 | 0.49 |
| 2917-TWI-18 | 555.0 | 543.7 | 1.02 | 0.0561 | 0.00585 | 0.01135 | 0.0011 | 0.00157 | 0.00006 | 10.1 | 0.4 |
| 2917-TW1-19 | 1445.7 | 1004.5 | 1.44 | 0.04308 | 0.0028 | 0.00972 | 0.00061 | 0.00162 | 0.00003 | 10.4 | 0.2 |
| 2917-TW1-20 | 1376.2 | 814.0 | 1.69 | 0.04637 | 0.004 | 0.00997 | 0.00083 | 0.00154 | 0.00004 | 10 | 0.26 |
| PM005-TW1-1 | 1873.3 | 757.3 | 2.47 | 0.0473 | 0.0049 | 0.0111 | 0.0011 | 0.0017 | 0.0000 | 11.0 | 0.2 |
| PM005-TW1-2 | 641.9 | 304.4 | 2.11 | 0.0792 | 0.0132 | 0.0177 | 0.0025 | 0.0018 | 0.0001 | 11.4 | 0.4 |

续表 1

| 样品及测点 | 含量/ 10^{-6} | | Th/U | 同位素比值 | | | | 年龄/Ma | | | |
|--------------|---------------|-------|------|-----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|----------------------------------|------------|
| | Th | U | | $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ | 1 σ | $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ | $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ | 1 σ |
| PM005-TW1-3 | 675.5 | 329.9 | 2.05 | 0.0367 | 0.0106 | 0.0076 | 0.0023 | 0.0017 | 0.0000 | 10.8 | 0.3 |
| PM005-TW1-4 | 523.0 | 778.6 | 0.67 | 0.0340 | 0.0066 | 0.0085 | 0.0016 | 0.0018 | 0.0000 | 11.6 | 0.3 |
| PM005-TW1-5 | 710.6 | 486.5 | 1.46 | 0.0513 | 0.0073 | 0.0124 | 0.0018 | 0.0018 | 0.0000 | 11.3 | 0.3 |
| PM005-TW1-6 | 1639.7 | 926.7 | 1.77 | 0.0571 | 0.0063 | 0.0129 | 0.0014 | 0.0017 | 0.0000 | 10.8 | 0.2 |
| PM005-TW1-7 | 3087.7 | 989.1 | 3.12 | 0.0421 | 0.0042 | 0.0100 | 0.0010 | 0.0017 | 0.0000 | 11.1 | 0.2 |
| PM005-TW1-8 | 873.3 | 993.3 | 0.88 | 0.0472 | 0.0050 | 0.0109 | 0.0012 | 0.0017 | 0.0000 | 10.9 | 0.2 |
| PM005-TW1-9 | 1023.6 | 904.3 | 1.13 | 0.0596 | 0.0057 | 0.0137 | 0.0013 | 0.0017 | 0.0000 | 10.9 | 0.2 |
| PM005-TW1-10 | 371.9 | 349.1 | 1.06 | 0.0965 | 0.0202 | 0.0272 | 0.0064 | 0.0018 | 0.0001 | 11.1 | 0.1 |
| PM005-TW1-11 | 773.4 | 777.6 | 0.99 | 0.1125 | 0.0126 | 0.0268 | 0.0028 | 0.0018 | 0.0000 | 11.1 | 0.3 |
| PM005-TW1-12 | 403.5 | 276.3 | 1.46 | 0.0088 | 0.0100 | 0.0021 | 0.0023 | 0.0017 | 0.0000 | 10.9 | 0.3 |
| PM005-TW1-13 | 709.5 | 812.8 | 0.87 | 0.0572 | 0.0050 | 0.0131 | 0.0011 | 0.0017 | 0.0000 | 10.7 | 0.2 |
| PM005-TW1-14 | 418.3 | 358.5 | 1.17 | 0.0505 | 0.0125 | 0.0106 | 0.0026 | 0.0016 | 0.0000 | 10.4 | 0.3 |
| PM005-TW1-15 | 366.1 | 268.5 | 1.36 | 0.0385 | 0.0118 | 0.0095 | 0.0029 | 0.0018 | 0.0000 | 11.3 | 0.3 |
| PM005-TW1-16 | 967.5 | 977.0 | 0.99 | 0.0434 | 0.0059 | 0.0104 | 0.0014 | 0.0018 | 0.0000 | 11.3 | 0.3 |
| PM005-TW1-17 | 444.8 | 379.6 | 1.17 | 0.0682 | 0.0090 | 0.0158 | 0.0019 | 0.0018 | 0.0000 | 11.4 | 0.3 |
| PM005-TW1-18 | 971.7 | 498.5 | 1.95 | 0.0552 | 0.0080 | 0.0126 | 0.0018 | 91000 | 0.0001 | 10.5 | 0.4 |
| PM005-TW1-19 | 485.9 | 334.5 | 1.45 | 0.0989 | 0.0121 | 0.0228 | 0.0028 | 0.0017 | 0.0000 | 11.0 | 0.3 |
| PM005-TW1-20 | 508.3 | 435.3 | 1.17 | 0.0522 | 0.0095 | 0.0112 | 0.0020 | 0.0017 | 0.0001 | 10.9 | 0.4 |

面斑岩、粗安质凝灰熔岩、粗安质熔结凝灰岩、粗安质火山碎屑岩组成的火山锥。纵观研究区新近纪火山活动过程,以溢流和侵入(侵入)活动为主,火山爆发指数一般小于 35,火山喷发方式属于斯特朗博利型或夏威夷型。火山堆积物出露规模普遍较小,从地表到深部岩相的垂直系列表现为:地表到近地表(喷发沉积相—喷溢相+涌流相—火山碎屑流相);近地表到火山根部(近源爆发角砾岩相—侵入岩穹相—火山颈相—次火山岩相);火山根部到深部(侵入相)。平面上,从火山盆地边缘向中心追索建立的岩相层序为:喷发沉积相—溢流相+碎屑流相—爆发相(空落堆积相+溅落堆积相)—侵入相(侵入相)。

新近纪火山活动是在区内早期古近纪火山活动结束后,随区域构造环境的改变(挤压为主的碰撞—拉张为主要的后碰撞)进一步发展演化而来,因区域构造属性不同,两者表现为截然不同的岩性组合和活动特点。首先空间上早期古近纪火山岩主要受控于近东西走向的区域断裂,火山岩呈东西带状,而晚期新近纪火山岩主要受控于近南北走向的区域断裂,火山岩呈南北带状。晚期新近纪火山机构与早期古近纪火山机构之间呈切割式组合或叠套式组合,火山机构内火山通道由于构造属性不同而不具

继承性;其次岩性组合上早期古近纪火山活动形成钙碱性—高钾钙碱性火山岩系,岩石地球化学特征反映其为壳源特征。晚期新近纪火山活动形成钾质—超钾质碱性火山岩系,岩石地球化学特征反映其幔源或壳幔混合的源区特征。整体上,冈底斯岩浆岩带西段新生代火山岩演化朝酸度降低、碱度增加的方向进行。

5.2 冈底斯岩浆岩带西段的新近纪火山构造属性及时空演化特征

印度—欧亚大陆持续挤压下,新近纪区域构造应力由陆—陆碰撞挤压阶段转化为后碰撞伸展阶段(图 8),地球动力学体系发生了转换(Armi et al., 1986; Colem et al., 1995; Hou et al., 2004),随东西向伸展活动不断增强,在拉萨地块内形成隆格尔裂谷、Lopukangri 裂谷、当惹雍错裂谷等近南北走向的断陷谷地。水平空间上近南北向裂谷几乎横穿了所有东西向的构造单元,而且其南端切割了藏南拆离系到达高喜马拉雅,向北则穿过拉萨地块和羌塘地块(卞爽等, 2021)。纵向空间上其边界主断裂切割岩石圈,为深部岩浆上升提供了通道。大量研究数据表明,区域上在拉萨地块内新近纪火山活动与近南北向断陷谷在出露空间上具一致性,同时在时间上

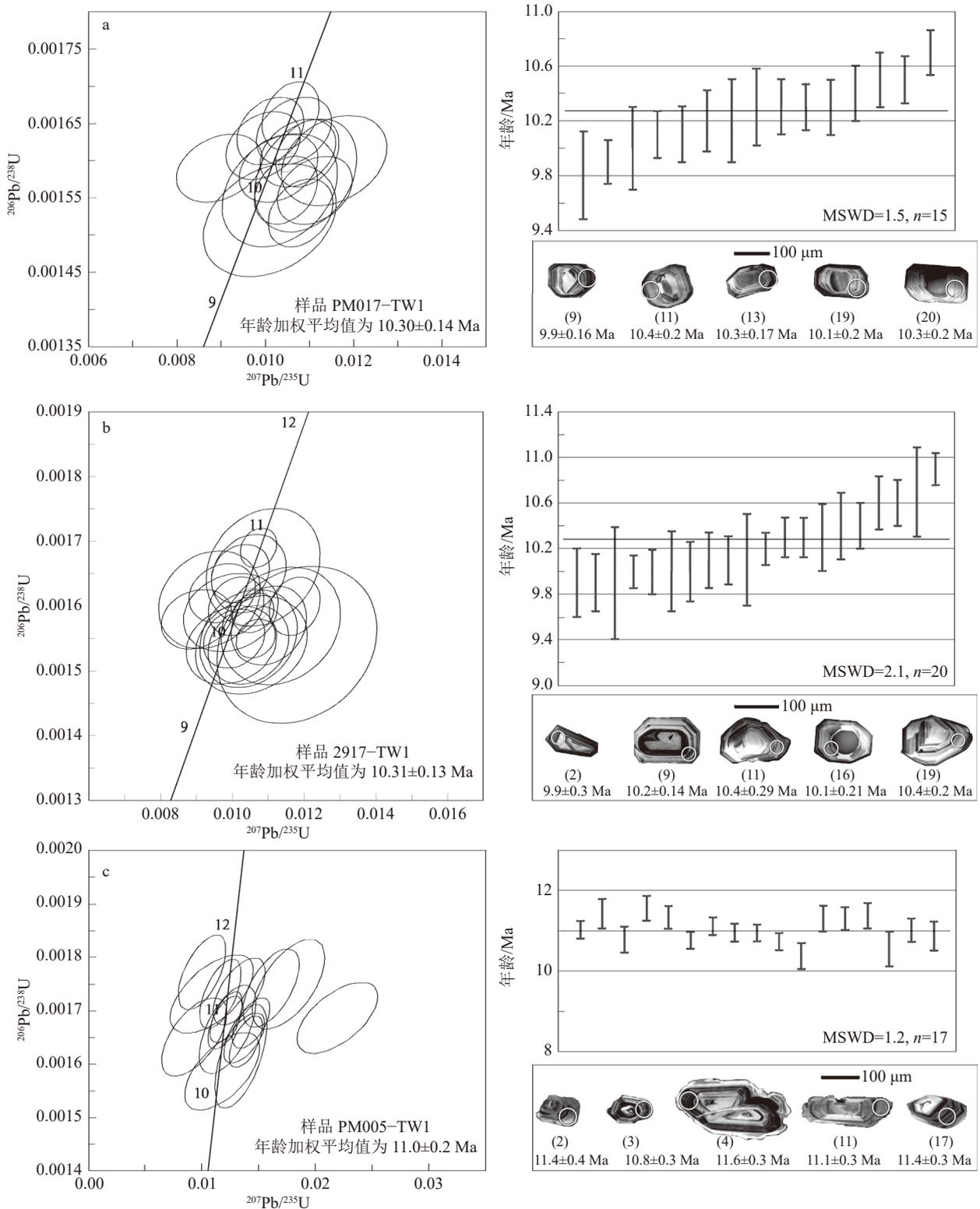


图 7 火山岩锆石阴极发光(CL)图像与 U-Pb 谐和图

Fig. 7 CL images of some representative zircon grains and U-Pb concordia diagrams of zircon grains from the volcanic rocks

a—启日火山机构侵入相玻基粗面斑岩 (PM017-TW1); b—熬定火山机构侵入相二长花岗斑岩 (2917-TW1)
c—熬定火山机构溢流相粗面安山岩 (PM005-TW1)

近南北向裂谷的启动时间(15~8 Ma)与断陷谷地内新近纪火山活动时间(16~9 Ma)重叠(图9),这种时空对应关系验证了广泛认为的新近纪火山与近南北向裂谷形成演化密切相关的观点(丁林等,2006;张巨等,2011)。

火山活动的时空分布特征是评估其构造属性的关键,笔者在达若-壮拉火山构造洼地内针对新近纪火山机构调查发现,新近纪火山主要沿达若-壮拉断陷谷地分布。不同火山机构内火山通道沿近南北向主边界断裂呈线状排列(图1),表现为近南北向主边界断裂控制火山口特征。达若-壮拉断陷谷地位于当惹雍错裂谷东侧,为当惹雍错主裂谷伴生的次级裂谷系,因此裂谷启动时间与主裂谷一致(14.5~13 Ma)(Wolff et al., 2019; 张佳伟等, 2020; Zuo et al., 2021)。本次在达若地区新近纪火山岩内获取的锆石 U-Pb 年龄为 11~10 Ma,而前人在惹雍错裂谷中获得的新近纪火山岩 Ar-Ar 年龄为 13~8 Ma(赵志丹等,2006),2处火山活动时间基本重叠。因此根据近南北向裂谷与新近纪火山活动时空关系认为,达若地区中新世早期(>13 Ma)随近南北向裂谷启动,主边界断裂切割了深部岩石圈,到中新世晚期(<13 Ma)近南北向断裂诱发了深部壳幔混合的源区岩浆上侵和火山喷发活动,形成由断裂谷地约束的新近

纪火山岩。综上所述,青藏高原东西向构造单元约束的地层分区内,新近纪火山岩不具有东西向带状分布特征,其在南北方向上在不同地层单元内具有穿越性。该火山岩既产于拉萨地块中,也产于南北两侧的特提斯喜马拉雅和羌塘地块内。后碰撞伸展阶段,随区域地球动力学体质转换,东西向构造单元已不是新近纪火山岩的约束界限。

空间演化方面,拉萨地体内近南北向裂谷启动时间具有自西向东逐步减小的趋势(15 Ma→8 Ma)(下爽等,2021),同时由近南北向断陷谷地受限的新近纪火山活动时间亦具有自西向东逐步减小的趋势(16 Ma→9 Ma)(赵志丹等,2006)。岩浆活动作为区域构造作用在地表的记录,反映了高原构造的演化关系。印度大陆向北对接-碰撞拉萨地块后,拉萨地块内后碰撞伸展阶段发育的拆离和伸展构造在东西轴线上不显示等时性,即新近纪拉萨地块西段首先发生伸展,形成近南北向断陷谷地和新近纪火山岩岩浆活动,随时间推移,拉张作用逐步增强,在拉萨地块东段开始发生伸展,形成近南北向断陷谷地和新近纪火山岩岩浆活动,东西时代差约7 Ma。

6 结论

通过对藏南冈底斯岩浆岩带西段达若-壮拉火

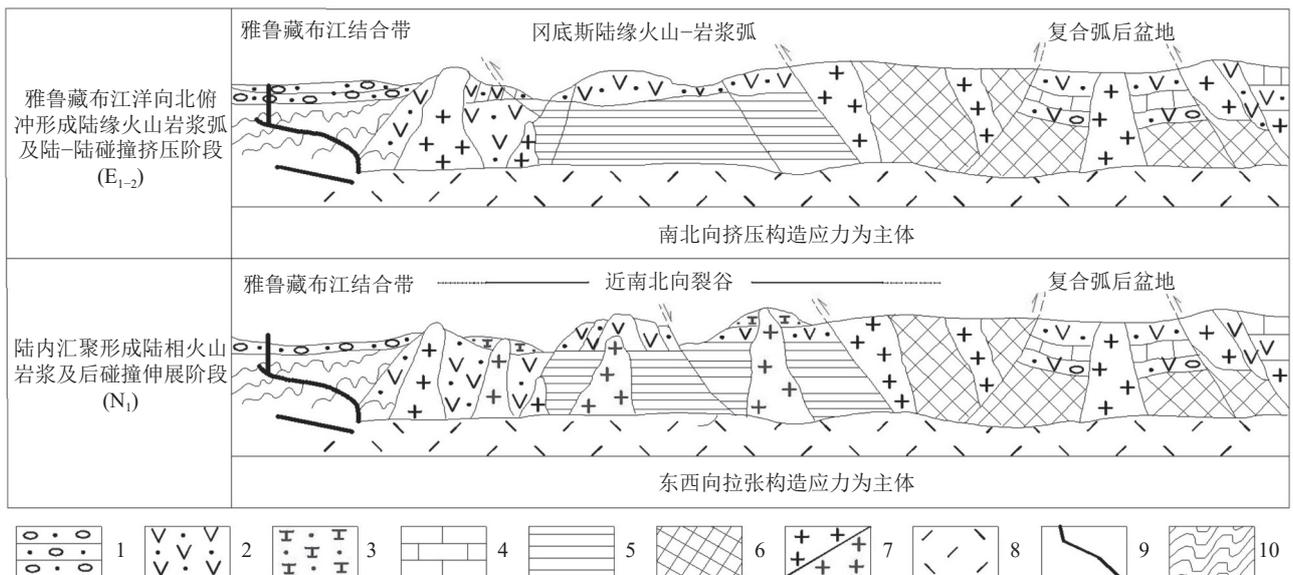


图8 达若地区新近纪区域构造岩浆演化示意图(据谢国刚等,2014修改)

Fig. 8 Neogene tectonic magmatic evolution models of the Daruo area

1—碎屑岩建造;2—古近纪中酸性火山岩系;3—新近纪钾质-超钾质火山岩系;4—碳酸盐岩建造;5—古生代基底地层;
6—深海复理石建造;7—侵入岩(古近纪、新近纪);8—陆壳基底;9—洋壳;10—构造混杂岩

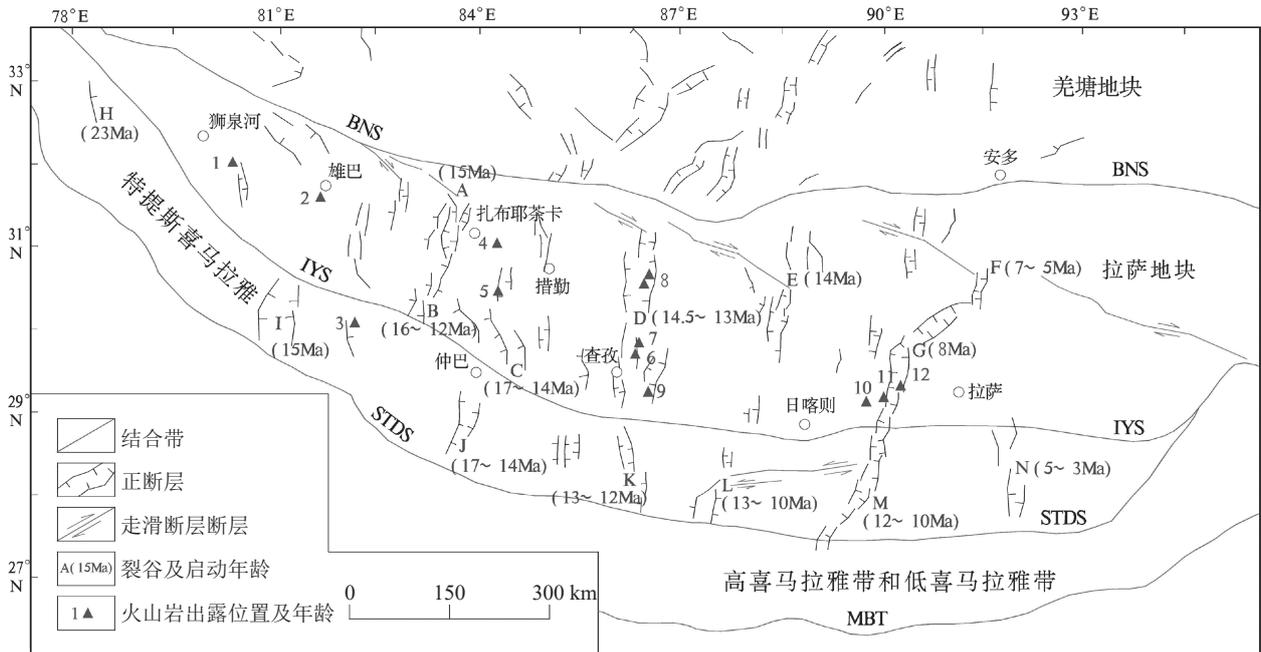


图 9 冈底斯岩浆岩带新近纪火山活动年龄与南北向裂谷启动年龄对比图

(南北向裂谷和启动时间据 Blisniuk et al., 2002; 卞爽等, 2021; 火山岩位置和年龄数据据赵志丹等, 2006; 刘栋等, 2011; 尼玛次仁等, 2015, 2016; 杨硕等, 2016)

Fig. 9 Comparison chart to show the initial ages of N-S rifts and Neogene volcanic activity ages in the Gangdise belt

1—狮泉河 (22 Ma, U-Pb); 2—雄巴盆地 (24 ~ 23 Ma, U-Pb); 3—仲巴县帕羊镇 (17 Ma, U-Pb); 4—依布茶卡 (16 ~ 15 Ma, Ar-Ar); 5—仲巴县贡木淌 (16 Ma, Ar-Ar); 6—许如错 (11 Ma, Ar-Ar); 7—查孜 (13 ~ 8 Ma, Ar-Ar); 8—当若雍错 (13 ~ 12 Ma, Ar-Ar) 9—昂仁县达若 (11 ~ 10 Ma, U-Pb); 10—南木林乌郁盆地 (13 ~ 12 Ma, Ar-Ar); 11—尼木麻江 (15 ~ 11 Ma, Ar-Ar); 12—当雄羊易地热田 (10 ~ 9 Ma, Ar-Ar). A—北隆格尔裂谷; B—南隆格尔裂谷; C—Lopukangri 裂谷; D—当惹雍错裂谷; E—申扎裂谷; F—谷露裂谷; G—念青唐古拉裂谷; H—Leo Pargil 裂谷; I—Gurla Mandhata 裂谷; J—Thakkhola 裂谷; K—孔错裂谷; L—定结裂谷; M—亚东裂谷; N—错那裂谷。
MBT—主边界断裂; STDS—藏南拆离系; IYS—印度河-雅鲁藏布江缝合带; BNS—班公湖-怒江缝合带

山构造洼地内的新近纪火山地层序列和时代等进行调查研究, 获得以下主要认识。

(1) 藏南冈底斯岩浆岩带西段达若-壮拉火山构造洼地的新近纪火山活动强度较低, 火山爆发指数整体小于 35, 火山喷发方式属于斯特朗博利型或夏威夷型, 并主要形成盾状岩穹和穹状熔岩台地 2 类主火山机构。该区新近纪火山的形成是在早期古近纪火山活动结束后, 随区域内东西向拉伸作用增强进一步发展演化而来的, 与早期古近纪火山呈切割式组合或叠套式组合, 两者火山机构内的火山通道不显示继承性。

(2) 达若-壮拉火山构造洼地新近纪火山分为年龄 11 Ma 和 10 Ma 的早晚 2 个喷发序列, 早期火山活动以溢流为主, 伴有小规模的爆发作用, 形成喷溢相(涌流堆积相)-碎屑流相-喷发沉积相组合; 晚期火山活动以侵出和侵入活动为主, 伴有小规模的爆发作用, 形成侵出相(侵入相)、次火山岩相-空落堆积

相组合。

(3) 达若-壮拉火山构造洼地新近纪火山主要形成于区域碰撞后的陆内近东西向伸展环境, 火山活动持续的时间较短, 主要介于 11~10 Ma 之间, 与其伴生的一系列近南北向地堑, 控制了新近纪火山岩的空间分布格局

致谢: 中国地质科学院地质研究所石玉若研究员和中国地质科学院地质力学研究所吴中海研究员对论文初稿进行了详细审阅, 并提出宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

参考文献

Armijo R, Tapponnier P, Mercier J L, et al. 1986. Quaternary extension in southern Tibet: Field observations and tectonic implications[J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 91: 13803-13872.
Blisniuk P M, Hacker B R, Glodny J, et al. 2002. Normal faulting in central Tibet since at least 13.5 Myr ago[J]. *Nature*, 412: 628-632.
Colem M, Hodges K. 1995. Evidence for Tiberan plateau uplift before 14

- Myr ago from a new minimumage for east-west extension[J]. *Nature*, 374: 49-52.
- Hou Z Q, Gao Y F, Qu X M, et al. 2004. Origin of adakitic intrusive generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 220: 139-155.
- Ludwig K R. 2003. Isoplot/Ex Version 3.00: a Geochronological Toolkit for Microsoft Excel[M]. Berkeley Geochronology Center, Berkeley, CA, USA.
- Liu Y, Gao S, Hu Z, et al. 2010. Continental and oceanic crust recycling-induced melt-CPeridotite interactions in the Trans-North China orogen: U-Pb dating, Hf isotopes and trace elements in zircons from mantle xenoliths[J]. *Journal of Petrology*, 51: 537-571.
- Wiedenbeck M, Aiiie P, Corfu F, et al. 1995. Three natural zircon standards for U-Th-Pb, Lu-hf, trace element and REE analyses[J]. *Geostandards and Geoanalytical Research*, 19: 1-23.
- Wolff R, Hetzel R, Dunkl I, et al. 2019. High-angle normal faulting at the Tangra Yumco Graben (Southern Tibet) since 15 Ma[J]. *The Journal of Geology*, 127(1): 15-36.
- Zuo J M, Wu Z H, Ha G G, et al. 2021. Spatial variation of nearly NS-trending normal faulting in the southern Yadong-Gulu rift, Tibet: New constraints from the Chongba Yumtso fault, Duoqing Co graben[J]. *Journal of Structural Geology*, 144: 104256.
- 卞爽, 于志泉, 龚俊峰, 等. 2021. 青藏高原近南北向裂谷的时空分布特征及动力学机制[J]. *地质力学学报*, 27(2): 1006-6616.
- 陈建林, 许继峰, 康志强, 等. 2006. 青藏高原西部措勤县中新世布嘎寺组钾质火山岩成因[J]. *岩石学报*, 22(3): 585-594.
- 丁林, 岳雅慧, 蔡福龙, 等. 2006. 西藏拉萨地块高镁超钾质火山岩及南北向裂谷形成时间和切割深度的制约[J]. *地质学报*, 80(9): 1252-1261.
- 黄勇, 牟世勇, 卢定彪, 等. 2004. 藏北鱼鳞山地区鱼鳞山组火山岩的特征及时代探讨[J]. *贵州地质*, 21(3): 148-151.
- 胡文洁, 田世洪, 杨竹森, 等. 2012. 拉萨地块西段中新世查加寺钾质火山岩岩石成因-岩石地球化学、年代学和 Sr-Nd 同位素约束[J]. *矿床地质*, 31(4): 813-830.
- 哈广浩, 吴中海, 何林, 等. 2018. 藏南邛多江地堑的晚新生代沉积地层及对南北向裂谷形成时代的初步限定[J]. *地质学报*, 92(10): 2051-2067.
- 李光明. 2000. 藏北羌塘地区新生代火山岩岩石特征及其成因探讨[J]. *地质地球化学*, 28(2): 38-44.
- 李才, 朱志勇, 迟效国, 等. 2002. 藏北改则地区鱼鳞山组火山岩同位素年代学[J]. *地质通报*, 21(11): 732-734.
- 刘栋, 赵志丹, 朱弟成, 等. 2011. 青藏高原拉萨地块西部雄巴盆地后碰撞钾质-超钾质火山岩年代学与地球化学[J]. *岩石学报*, 27(7): 2045-2059.
- 刘栋, 赵志丹, 朱弟成, 等. 2013. 青藏高原南部拉萨地块中新世超钾质岩石中的锆石记录[J]. *岩石学报*, 29(11): 3703-3715.
- 刘登忠, 陶晓风, 马润则, 等. 2015. 中华人民共和国 1: 25 万措勤县幅 (H45 C 001001) 区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社.
- 马润则, 刘登忠, 陶晓风, 等. 2002. 西藏措勤地区发现第三纪富钾岩岩岩[J]. *地质通报*, 21(11): 728-731.
- 莫宣学, 赵志丹, 邓晋福, 等. 2003. 印度-亚洲大陆主碰撞过程的火山作用响应[J]. *地学前缘*, 10(3): 135-148.
- 尼玛次仁, 王国灿, 顿多, 等. 2015. 西藏狮泉河地区高钾-钾质火山岩的岩石学、地球化学及锆石 U-Pb 年龄[J]. *地质通报*, 34(9): 1671-2552.
- 潘桂棠, 李兴振, 王立全, 等. 2002. 青藏高原及邻区大地构造单元初步划分[J]. *地质通报*, 21(11): 701-707.
- 石和, 马润则, 刘登忠, 等. 2005. 西藏措勤地区的中新世布嘎寺组[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 32(2): 173-176.
- 陶奎元. 2021. 火山岩相构造学[M]. 南京: 江苏凤凰科学技术出版社.
- 王保弟, 陈凌康, 许继峰, 等. 2011. 拉萨地块麻江地区具有“超钾质”成分的钾质火山岩的识别及成因[J]. *岩石学报*, 27(6): 1662-1674.
- 谢国刚, 邹爱建, 袁建芽, 等. 2014. 中华人民共和国 1: 25 万措麦区幅 (H4 C 002002) 区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社.
- 杨硕, 向树元, 张先, 等. 2016. 西藏仲巴地块加达钾质火山岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄和地球化学特征[J]. *地质通报*, 35(6): 1671-2552.
- 赵志丹, 莫宣学, Nomade Sebastien, 等. 2006. 青藏高原拉萨地块碰撞后超钾质岩石的时空分布及其意义[J]. *岩石学报*, 22(4): 787-794.
- 张巨, 马润则, 岳相元, 等. 2011. 西藏措勤布嘎寺组中基性火山岩特征及成因[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 38(2): 1671-9727.
- 张计东, 张振利, 魏文通, 等. 2015. 中华人民共和国 1: 25 万霍尔巴幅 (H44 C 002004)、巴巴扎东幅 (H45 C 003004) 区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社.
- 张振利, 张计东, 魏文通, 等. 2015. 中华人民共和国 1: 25 万亚热幅 (H44 C 001003)、普兰县幅 (H44 C 002003, 国内部分) 区域地质调查报告[M]. 北京: 地质出版社.
- 张佳伟, 李汉敷, 张会平, 等. 2020. 青藏高原新生代南北走向裂谷研究进展[J]. *地球科学进展*, 35(8): 848-862.