

内蒙古东部晚第四纪玛珥式火山的堆积序列及 喷发过程研究

张进奎^{1,2}, 李 霓¹, 白志达², 赵勇伟¹, 张方华³

(1. 中国地震局地质研究所, 活动构造与火山重点实验室, 北京 100029; 2. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 3. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871)

摘要: 随着全球火山研究的深入,地质学家在大多数火山群中均发现了特殊成因的玛珥式火山。以低平火山口和低矮锥体著称的玛珥式火山主要由具有爬升层理、平行层理、大型低角度交错层理等结构构造的基浪堆积物组成,是火山喷发演化过程研究的重要对象。近年来,在内蒙古东部的诺敏河-阿尔山-柴河和阿巴嘎火山群中也先后发现了典型的玛珥式火山及基浪堆积物。本文从野外火山地质特征着手,以火山学与火山地质学理论为指导,结合国内外玛珥式火山的研究成果,对内蒙古东部晚第四纪玛珥式火山的分布、产物和结构构造等火山地质特征进行了归纳总结,将其大致划分为3个喷发期次,分别是以基浪堆积物为主的射汽-岩浆爆发、以降-落-落堆积物为主的岩浆喷发和以碱性橄榄玄武岩为主的岩浆溢流期次。复合火山的活动时代总体属于晚更新世,其中玛珥式火山的形成时代为晚更新世早中期。通过分析研究区的地层、火山产物和区域断裂构造等地质特征,推断射汽-岩浆爆发的深度较浅,并进一步探讨了玛珥式火山的成因机制,模拟其喷发演化过程,认为玛珥式火山与斯通博利式、夏威夷式等类型火山具有继承性演化关系。

关键词: 内蒙古东部;晚第四纪;玛珥式火山;堆积序列;射汽-岩浆爆发过程

中图分类号: P317.2; P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)03-0339-15

Research on the accumulation sequence and eruptive process of Late Quaternary Maars in eastern Inner Mongolia

ZHANG Jin-kui^{1,2}, LI Ni¹, BAI Zhi-da², ZHAO Yong-wei¹ and ZHANG Fang-hua³

(1. Key Laboratory of Active Tectonic and Volcano, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China; 2. School of Earth Science and Mineral Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Geophysics Department, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: With the progress in the research on global volcanoes, geologists have discovered volcanoes of Maars type with special genesis in most volcanic groups. Maars, characterized by low-relief, broad volcanic crater and low flat cone, are mainly composed of base surges with climbing bedding, parallel bedding, large low-angle cross-bedding and some other structures, thus being an important object for studying the evolution process of volcanic eruption. Many Maars with typical base surges have recently been discovered from Nuominhe, Arshan-Chaihe and

收稿日期: 2019-01-02; 接受日期: 2019-03-04; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 国家自然科学基金项目(41772356, 41572320)

作者简介: 张进奎(1993-), 男, 矿物学、岩石学、矿床学硕士研究生, 岩浆作用与资源环境研究方向, 主要从事第四纪火山学研究, E-mail: jinkuizhang258@gmail.com; 通讯作者: 李 霓(1967-), 女, 研究员, 主要从事火山岩岩石学与地球化学研究工作, E-mail: lini67@sina.com; 白志达(1956-), 男, 教授, 主要从事区域地质调查和火山学教学和科研工作, E-mail: baizd@cugb.edu.cn。

Abaga volcanic clusters in eastern Inner Mongolia. Based on comprehensive field survey and available researches both in China and abroad, the authors summarized the geological features of the late Quaternary Maars in eastern Inner Mongolia by theories of volcanology and volcanic geology, including their distribution, products and typical structures. The activity of the volcano is divided into three stages: phreatomagmatic eruption stage dominated by base surges, magma eruption stage represented by fall-spatter deposits, and magma overflow stage with alkaline olivine basalt. These composite volcanoes were active in the late Pleistocene, whereas the Maars mainly erupted at early to middle stage stated above. The unique strata, volcanic product and regional tectonic structure all indicate that phreatomagmatic eruption was generated at the shallow depth. Based on the discussion of the genetic mechanism and evolution simulation, the authors infer that there exists an inherited relationship between Maars and other volcanoes, such as Strombolian and Hawaiian.

Key words: eastern Inner Mongolia; Late Quaternary; Maars; accumulation sequence; the process of phreatomagmatic eruption

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41772356, 41572320)

玛珥式火山是一种成因特殊但较为常见的火山类型,是由射汽或射汽-岩浆爆发产生的一系列基浪堆积物构成且具有明显的低平火山口和低矮锥体的火山机构,因而区别于一般岩浆喷发而形成的火山。当火山活动时,浅地表砂砾岩等相对封闭环境含水层中的地下水不断受沿构造薄弱带上侵的炽热岩浆的加热而汽化,从而形成一个或多个高压体系,一旦压力值超过上覆围岩的临界压力值时就会立即发生爆炸,产生含有大量围岩碎屑、火山砂砾、火山灰、泥沙质和水蒸汽等物质的火山基浪涌流,以湍流的形式紧贴近地表自火山口向外快速流动,经过沉积、破裂、坍塌等过程后形成一系列大小不等且形态各异的低平火山口(maar)和具有各种结构构造的基浪堆积物(base surges)(Moore, 1967; Lorenz, 1973, 1975, 1986; 孙谦等, 2003, 2005b)。在玛珥式火山形成之后,大量地表水充填于低平火山口之中形成一系列呈串珠状分布且规模不同的湖泊,即称为玛珥湖。由于玛珥湖的广泛分布以及其独特的地质环境和水文特征,使其能够保存长期连续稳定的沉积记录,从而成为全球古气候和古环境变化的研究对象,可进一步为预测未来全球变化提供理论基础(郭正府等, 2002; 储国强等, 2018)。

就全球而言,玛珥式火山分布广泛,遍布各个国家,其中德国、美国、菲律宾、意大利、英国、法国、西班牙、冰岛、以色列、加拿大等地分布最多(Lorenz, 1974, 1986, 2003; Dellino and Volpe, 2000; Kosik *et al.*, 2016; Yoon *et al.*, 2017),纵跨寒带、温带、亚热带和热带的中国也具有相当数量的玛珥式火山。在中国,玛珥式火山分布最多且最著名的火山群为雷

琼火山群和龙岗火山群(刘嘉麒等, 2000; 王福生等, 2004; 储国强等, 2018)。在雷琼火山群中,广东省雷州半岛的湖光岩、鹰峰岭、硃洲岛那洞湾等以及海南省的罗经盘、雷虎岭-永茂岭、兵马角、老刘村等地均存在玛珥式火山及相应的基浪堆积物(郭正府等, 2002; 孙谦等, 2003; 魏海泉等, 2003; 孙谦等, 2005a, 2005b)。在吉林龙岗火山群中相继发现大龙湾、二龙湾、三角龙湾、四海龙湾、龙泉龙湾和大翁圈等玛珥式火山(魏海泉等, 1999; 樊祺诚等, 2001, 2002; 徐德兵等, 2005; 白志达等, 2006)。广西北部湾涠洲岛和斜阳岛也是典型的玛珥式火山(孙谦等, 2006)。有的玛珥式火山被后期火山活动所破坏,局部可见射汽-岩浆成因的基浪堆积物;有的玛珥式火山保存完好,形成积水或干枯的玛珥式火山湖。2004年,世界上最典型的德国艾菲尔(Eifel)玛珥湖还与广东省湖光岩玛珥湖正式结为“姐妹湖”。

由于有些地区植被覆盖严重,火山地质工作程度较低,隐藏于内蒙古东部草原、森林中的火山群并不知名。20世纪末期以来,内蒙古东部一系列火山群不断被发现,有一些已经建设为火山地质公园。然而,各火山群中研究程度较高的火山类型仍然是斯通博利式火山、亚布里尼式火山和夏威夷式火山,对玛珥式火山的研究程度仍然较低。随着对各个火山群地质特征的深入了解,玛珥式火山的成因机制与演化过程成为人们关注的科学问题。本文从野外火山地质特征着手,以火山学与火山地质学理论为指导,结合国内外玛珥式火山的研究成果,对内蒙古东部晚第四纪玛珥式火山的分布、产物和结构构造

等火山地质特征进行归纳总结,划分火山的喷发期次,确定火山活动时代,分析其成因机制和喷发演化过程。

1 玛珥式火山地质特征

内蒙古东部晚第四纪火山总体呈北东向分布,粗略统计有 400 多座,主要分布于诺敏河、阿尔山-柴河、阿巴嘎、达里诺尔和乌兰哈达火山群(图 1)(白志达等, 2012; 樊祺诚等, 2012, 2015),火山类型主要为斯通博利式,其次为亚布里尼式、夏威夷式和玛珥式。其中,有 10 余座火山属于典型的玛珥式火山,具有特殊的基浪堆积物和结构构造特征(表 1),如诺敏河的西热克特奇呼通,阿尔山-柴河的卧

牛泡子、乌苏浪子湖和布特哈,阿巴嘎的浩特乌拉、车勒乌拉和额斯格乌拉等(赵勇伟, 2007; 涂志民, 2010; 王妍, 2011; 王锡娇等, 2012)。内蒙古东部大多数玛珥式火山都是由不同活动时代和喷发期次的基浪堆积物、降落-溅落堆积物和熔岩流构成的复合火山(白志达等, 2012)。

晚更新世早中期以射汽-岩浆爆发为主、由基浪涌流堆积而成的基浪堆积物既具备火山喷发物相应的结构构造特征,又具备沉积岩中常见的构造特征,如平行层理、大型低角度交错层理和层理下陷等(Lorenz, 1973, 1975, 2003; Kokelaar, 1986; 孙谦等, 2003)。然而在以往的地质研究过程中,大多数地质工作者总是将其误认为沉积岩。由于逐渐减弱的水动力条件和重力分选作用,基浪涌流堆积的玄

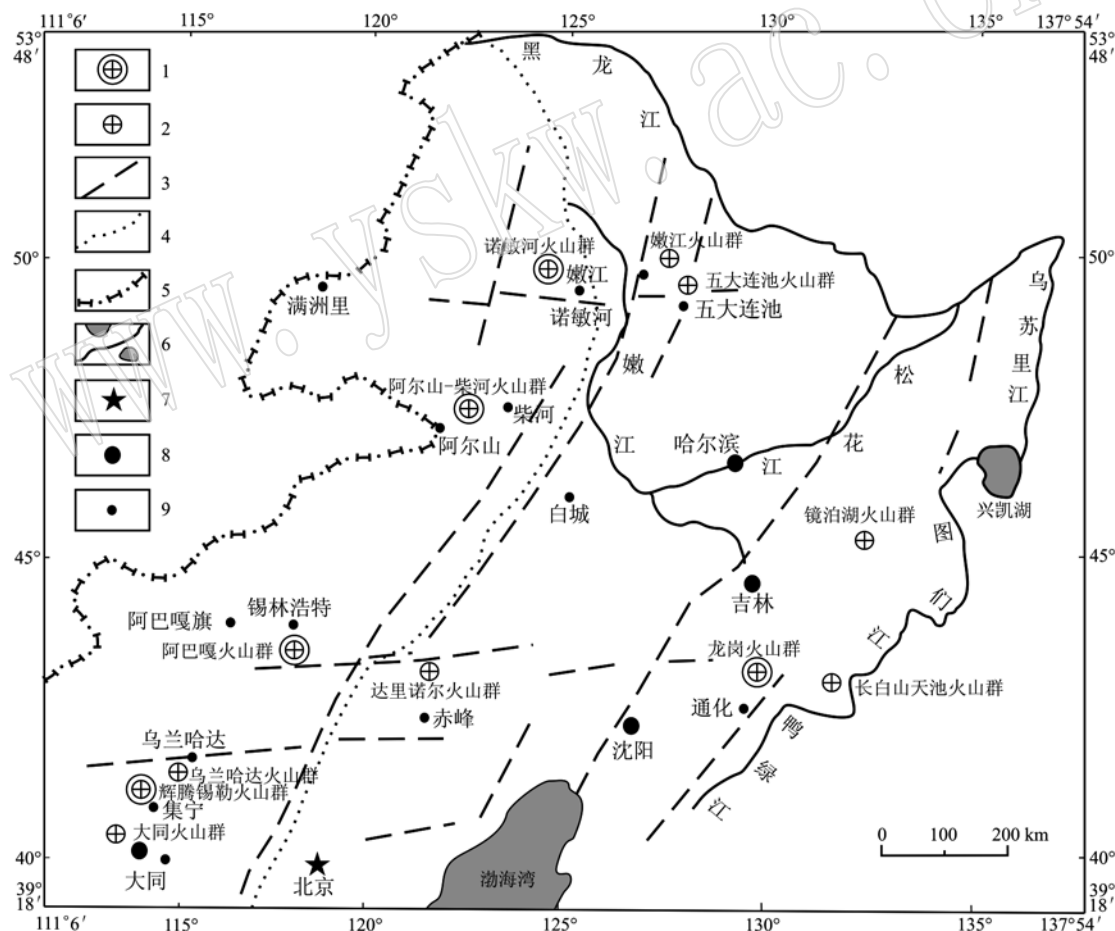


图 1 中国东北和内蒙古东部地区第四纪火山群分布示意图(据白志达等, 2012 修改)

Fig. 1 Sketch map of Quaternary volcanic cluster in Northeast China and eastern Inner Mongolia (modified after Bai Zhida et al., 2012)

1—存在玛珥式火山的火山群; 2—推测存在玛珥式火山的火山群; 3—主要区域断裂(据中国地质调查局, 2004); 4—地壳 40 km 等厚线;
5—国界; 6—海洋、河流和湖泊; 7—中国首都; 8—省会城市; 9—市级城市
1—volcanic cluster containing Maars; 2—volcanic cluster probably containing Maars; 3—principal regional structures (after CGS, 2004); 4—
isopach of 40 km of the crust; 5—national boundaries; 6—oceans, rivers and lakes; 7—capital of China; 8—provincial capital; 9—municipal city

表 1 内蒙古东部典型玛珥式火山特征
Table 1 Main characteristics of typical Maars in eastern Inner Mongolia

火山群名称	火山名称	地理坐标	推测时代	形状		
诺敏河火山群	西热克特奇呼通火山	122°59′11″E,49°21′7″N	晚更新世早期	椭圆形		
阿尔山-柴河火山群	卧牛泡子火山	121°17′27″E,47°34′31″N	晚更新世早期	圆形		
阿巴嘎火山群	浩特乌拉火山	115°08′18″E,43°50′30″N	晚更新世中期	圆形		
	车勒乌拉火山	114°14′23″E,44°15′18″N	晚更新世中期	圆形		
	额斯格乌拉火山		晚更新世早期	椭圆形		
火山群名称	锥体大小/km	火山口直径/km	火山口深度/m	坡度/(°)	标高/m	二环结构
诺敏河火山群	2.5×1.9	1.2	10	7~9	50	较明显
阿尔山-柴河火山群	4.2×4.2	1.9	55	8	35	较明显
阿巴嘎火山群	3×3	1.5	50	8~13	40	非常明显
	6.8×6.8	2.5	40	7	55	不明显
	7.8×6.3	4	15	6~8	45	不明显

武质火山渣具有良好的分选性和一定的磨圆程度(孙谦等, 2005a)。横向上, 自火山口中心向外玄武质火山渣的粒度逐渐减小, 磨圆程度也越来越好。同时, 在近火山口的基浪堆积物中常常发育向火山口中心倾斜且产状较陡的爬升层理, 火山口垣的基浪堆积物中则多发育平行层理, 向外逐渐形成大型低角度交错层理。此外, 在火山远源相的基浪堆积物中通常可见能代表射汽-岩浆爆发的球粒状增生火山砾(孙谦等, 2003, 2006)。增生火山砾是射汽-岩浆爆炸产生的细小碎屑等物体在涌浪推动下向远离火山口方向运动期间, 物体表面粘结了细粒火山灰和尘土等, 并在滚动过程中形成的圆形圈层(Lorenz, 1986; 孙谦等, 2005b)。一般情况下, 离火山口越远, 滚动距离越长, 增生火山砾的粒度越大。因此, 增生火山砾的圈层构造极为发育, 是由大小不等的同心圆球组成, 与鲕砾灰岩中的鲕砾类似。增生火山砾主要由两部分组成, 一部分是由围岩碎屑、玄武质火山碎屑、生物碎屑和气泡构成的内核, 另一部分则是由火山灰、粉砂质、泥质和胶体等沉积物组成的同心圈层外壳。

晚更新世中晚期, 由于岩浆的增多和地下水的减少, 火山活动转变为以岩浆爆发和溢流为主, 先后形成少量覆盖于基浪堆积物之上的灰黑色降落玄武质火山碎屑和覆盖于基浪堆积物和降落堆积物之上的砖红色溅落强熔结集块岩以及大量自火山口溢出的玄武岩(白志达等, 2012; 王锡娇等, 2012)。

1.1 诺敏河火山群

西热克特奇呼通火山是诺敏河火山群中最典型的玛珥式火山, 位于诺敏河卧斯门东缘, 地理坐标为 E122°59'11", N49°21'07", 距诺敏河镇北西约 55 km。

该火山最高海拔为 890 m, 主要由早期玛珥式火山锥、中期降落-溅落的中心叠置锥和向南流的晚期玄武质熔岩流组成(图 2)。整个复合火山锥体东、西侧高度分别为 120 m 和 170 m。玛珥式火山锥体呈椭圆形, 高度约 50 m, 东西向长轴直径约 2.5 km, 南北向短轴约 1.9 km。低平火山口呈圆形, 直径约 1.2 km, 深度约 10 m。中心叠置锥呈椭圆形, 南北长轴直径约 2.1 km, 东西向短轴约 1.5 km, 火山口深度约 35 m。由于后期熔岩流等地质作用的改造, 西热克特奇呼通玛珥式火山的双环结构轮廓并不太清晰(涂志民, 2010)。低平火山锥的射汽-岩浆成因的基浪堆积物属于晚更新世早期火山活动的产物, 主要分布于火山口四周和沿北东向呈线性展布。基浪堆积物中发育有大量的低角度交错层理、平行层理和下陷构造。在远离火山口的北东侧基浪堆积物细粒凝灰岩岩层中可见球粒状增生火山砾, 平均粒径为 0.5 cm, 最大粒径为 1.2 cm, 最小粒径为 0.1 cm。构成中心叠置锥的降落-溅落堆积物属于晚更新世中期火山喷发的产物, 主要是一套以喷泉式喷发为主且覆盖于基浪堆积物之上的溅落堆积砖红色玄武质强熔结集块岩。渣状熔结集块岩中含有大量红色、灰黑色火山弹和熔岩饼。局部可见夹于基浪堆积物和熔结集块岩之间的黑色降落玄武质火山渣, 厚度为 2 ~ 5 cm。晚更新世中晚期的火山产物主要是一套向南流动的熔岩流。熔岩类型主要为结壳熔岩、块状熔岩, 局部可见渣状熔岩, 岩性为灰黑色碱性橄榄玄武岩和碧玄岩。火山岩的 K₂O 含量为 2% ~ 4%, 且 K₂O > Na₂O - 2%, 属于钾质系列火山岩(樊祺诚等, 2012)。这一系列火山产物的分布特征表明西热克特奇呼通火山活动经历了射汽-岩浆爆

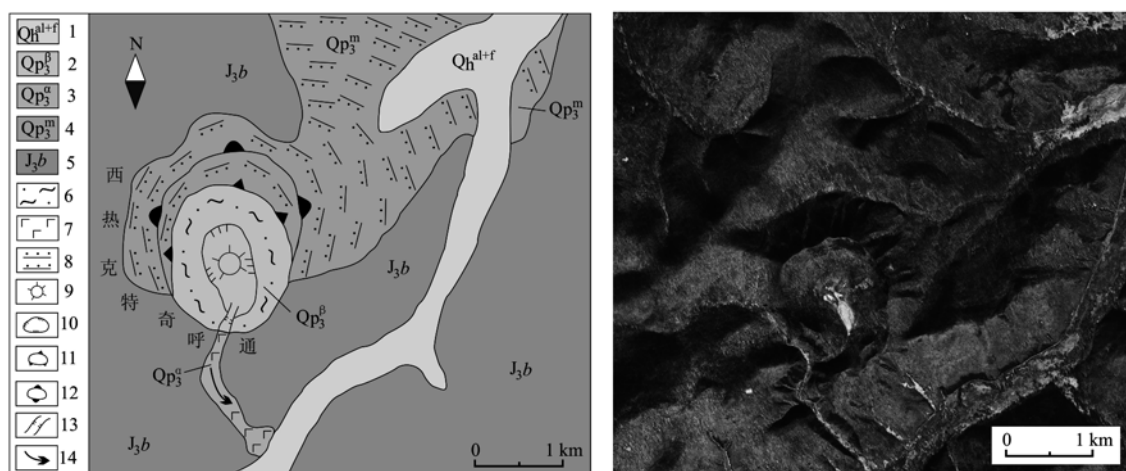


图2 西热克特奇呼通火山锥体结构地质图(左)与卫星图(右)[据涂志民(2010)修改]

Fig.2 Geological map of the structure(left)and satellite map (right) of Xireketeqihutong volcano (modified after Tu Zhimin, 2010)

1—全新统河流相冲积物; 2—上更新统玄武岩; 3—上更新统火山碎屑物; 4—上更新统基浪堆积物; 5—上侏罗统流纹岩; 6—溅落堆积物;
7—玄武岩; 8—基浪堆积物; 9—喷火口; 10—火山口; 11—溅落锥; 12—玛珥式火山锥; 13—岩浆溢出口; 14—熔岩流向
1—Holocene fluvial alluvium; 2—upper Pleistocene basalt; 3—upper Pleistocene tephra; 4—upper Pleistocene base surges; 5—upper Jurassic rhyolite; 6—splash down deposits; 7—basalt; 8—base surges; 9—bocca; 10—crater; 11—spatter cone; 12—a cone of Maars; 13—magmatic vent; 14—direction of lava flow

发、岩浆爆发与溢流的演化过程。

1.2 阿尔山-柴河火山群

阿尔山-柴河火山群中发育了大量的晚更新世玛珥式火山,如卧牛泡子、乌苏浪子湖、布特哈、水帘洞和绰尔河西湖等(白志达等, 2012; 崔晓歌, 2018)。其中,卧牛泡子(图3)和乌苏浪子湖的火山形态较为完整。由于植被覆盖较为严重,布特哈、水帘洞和绰尔河西湖西南侧可见零星分布的基浪堆积物。在卧牛泡子和水帘洞均发现了夹于中更新世坡积物和晚更新世坡积物之间的基浪堆积物(图4)。此外,零下30℃不结冰的哈拉哈河和卧牛泡子湖发育多处富硫化氢的低温温泉,且经常发生低级别地震,表明阿尔山火山群的岩浆活动仍然较为强烈(赵勇伟, 2007; 白志达等, 2012)。

卧牛泡子火山位于柴河镇北侧300 m处,地理坐标为E121°17'27", N47°34'31",是阿尔山-柴河火山群中最典型的玛珥式火山之一。该火山最高海拔为934 m,地形为南低北高,主要由基浪堆积物和玄武岩组成(图5)。锥体呈圆形,直径约4.2 km,火山口呈圆形,直径约1.9 km,深度为55 m。基浪堆积物主要分布于卧牛泡子火山的西南和东南侧,覆盖于晚侏罗世流纹质火山岩之上,主要成分为灰黑色火山碎屑和围岩碎屑,粒径为0.5~3 cm。西南侧由火山碎屑涌流堆积而成的火山剖面自下而上大致

划分为3个喷发单元:第1单元内发育平行层理,至少有25个韵律层,每个韵律层底部主要为粗粒火山碎屑,顶部为泥质火山细砂;第2和第3单元均发育平行层理和大型低角度交错层理,但二者的层理产状相差较大。3个单元之间分别有一个特别明显的侵蚀面。溅落堆积物主要为一套含大量火山弹和熔岩饼的近火山口相砖红色强熔结集块岩,主要分布于火山湖东北侧晚侏罗世流纹质火山岩上的4个小火山锥中。此外,卧牛泡子火山西南侧也有少量的覆盖于基浪堆积物之上的溅落堆积物。由于地形的限制,大量中晚期的基性熔岩流自卧牛泡子火山口南侧往南和西南方向流动,形成一套以结壳熔岩为主的玄武岩。玄武岩的 K_2O 含量小于2%,且 $K_2O > Na_2O - 2\%$,属于钠质系列火山岩(樊祺诚等, 2012)。卧牛泡子火山以早二叠世碎屑岩和晚侏罗世流纹岩为基底,先后形成的晚更新世早期基浪堆积物、中晚期降落-溅落堆积物和溢流玄武岩叠置在一起。

1.3 阿巴嘎火山群

阿巴嘎火山群中目前已发现了6座保存较为完整的玛珥式火山,其中最为典型的是浩特乌拉、额斯格乌拉和车勒乌拉(王锡娇等, 2012)。卫星图和地形图上均显示这3个玛珥式火山具有典型的双轮山地貌,并在野外考察过程中得到验证。外轮山是由

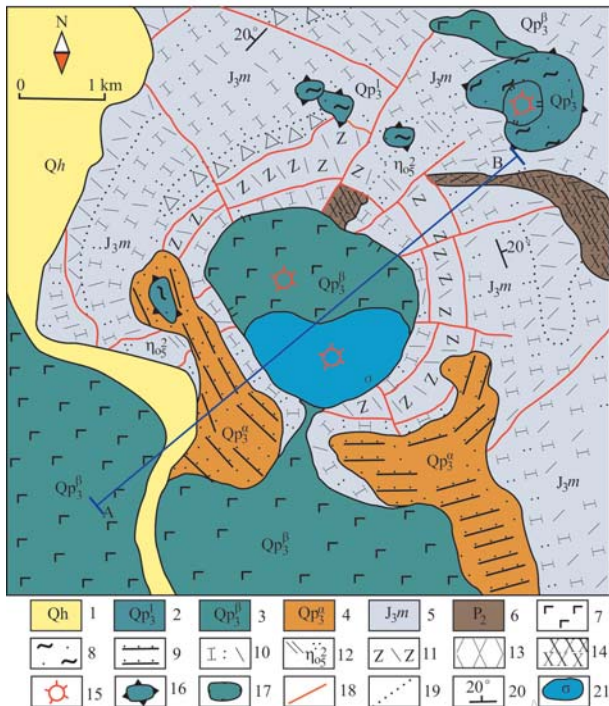


图3 卧牛泡子火山锥体结构地质图[据赵勇伟(2007)修改]
Fig. 3 Geological map of the structure of Woniupaozi volcanic cone(modified after Zhao Yongwei, 2007)

1—全新统冲积物; 2—上更新统上部火山碎屑物; 3—上更新统下部玄武岩; 4—上更新统下部火山碎屑物; 5—上侏罗统流纹岩; 6—上二叠统碎屑岩; 7—碱性玄武岩; 8—降落-溅落堆积物; 9—基浪堆积物; 10—熔结凝灰岩; 11—侵入相霏细岩; 12—石英二长岩; 13—流纹岩; 14—基底岩层; 15—喷火口; 16—溅落锥; 17—火山口; 18—断层; 19—剖面线; 20—产状; 21—湖泊
1—Holocene alluvium; 2—the top of upper Pleistocene tephra; 3—the middle of upper Pleistocene basalt; 4—the bottom of upper Pleistocene tephra; 5—upper Jurassic rhyolite; 6—upper Permian clastic rocks; 7—alkali basalt; 8—fall-splash down deposit; 9—base surges; 10—ignimbrite; 11—intrusive felsite; 12—adamellite; 13—rhyolite; 14—foundation bed; 15—bocca; 16—spatter cone; 17—crater; 18—fault; 19—section line; 20—attitude; 21—lake

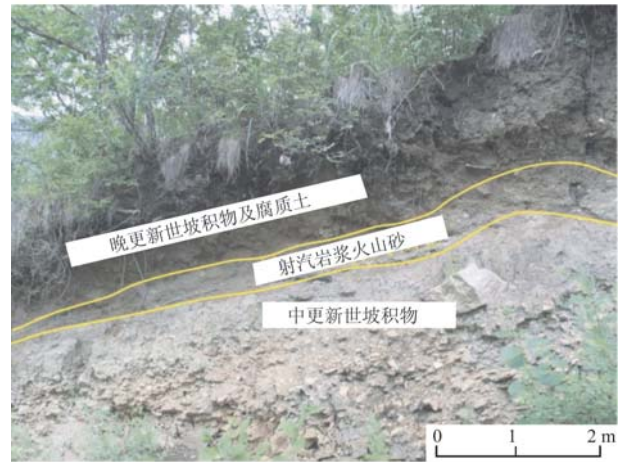


图4 卧牛泡子基浪堆积物与坡积物的接触关系
(据赵勇伟, 2007)

Fig. 4 The contact profile between base surges and slope deposits of Woniupaozi volcano (after Zhao Yongwei, 2007)

晚更新世早中期射汽-岩浆成因的基浪堆积物构成的低平火山锥, 锥体直径为3~8 km, 高度为15~55 m, 锥体坡度为5°~15°, 总体呈外陡内缓, 火山口直径为1.5~4.0 km, 火山口深度为15~55 m。内轮山是由晚更新世中晚期降落的玄武质火山渣和溅落的熔结集块岩以及溢流式的碱性橄榄玄武岩构成的中心叠置锥, 锥体直径为0.5~1.5 km, 高度为30~80 m, 锥体坡度一般为30°, 火山口直径为0.3~1.2 km, 深度为25~65 m, 可见多个喷火口。在完整的火山剖面中, 自下而上依次为基浪堆积物、降落-溅落堆积物和玄武质熔岩(图6a、6b)。厚0.5~15 m不等的基浪堆积物由松散或半固结的碎屑物和泥沙

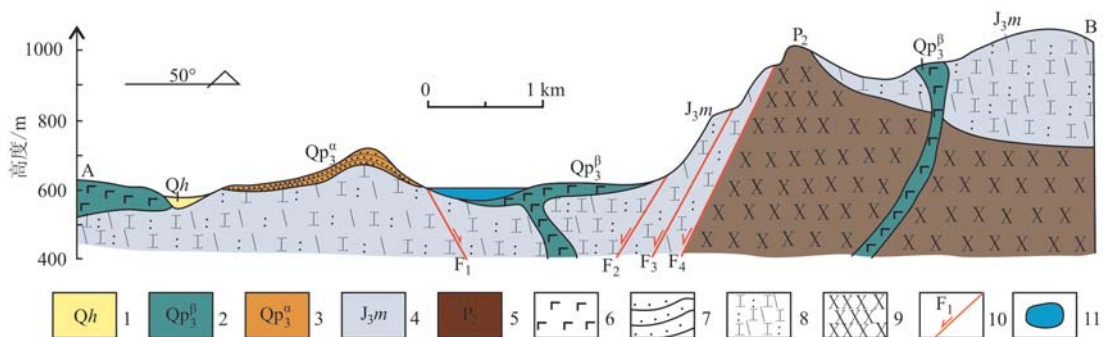


图5 卧牛泡子火山剖面图(据赵勇伟, 2007)

Fig. 5 Cross section of Woniupaozi volcano (after Zhao Yongwei, 2007)

1—全新统冲积物; 2—上更新统顶部玄武岩; 3—上更新统底部火山碎屑物; 4—上侏罗统流纹岩; 5—上二叠统碎屑岩; 6—碱性玄武岩; 7—基浪堆积物; 8—流纹岩; 9—基底岩层; 10—正断层; 11—湖泊
1—Holocene alluvium; 2—the top of upper Pleistocene basalt; 3—the bottom of upper Pleistocene tephra; 4—upper Jurassic rhyolite; 5—upper Permian clastic rocks; 6—alkali basalt; 7—base surges; 8—rhyolite; 9—foundation bed; 10—normal fault; 11—lake

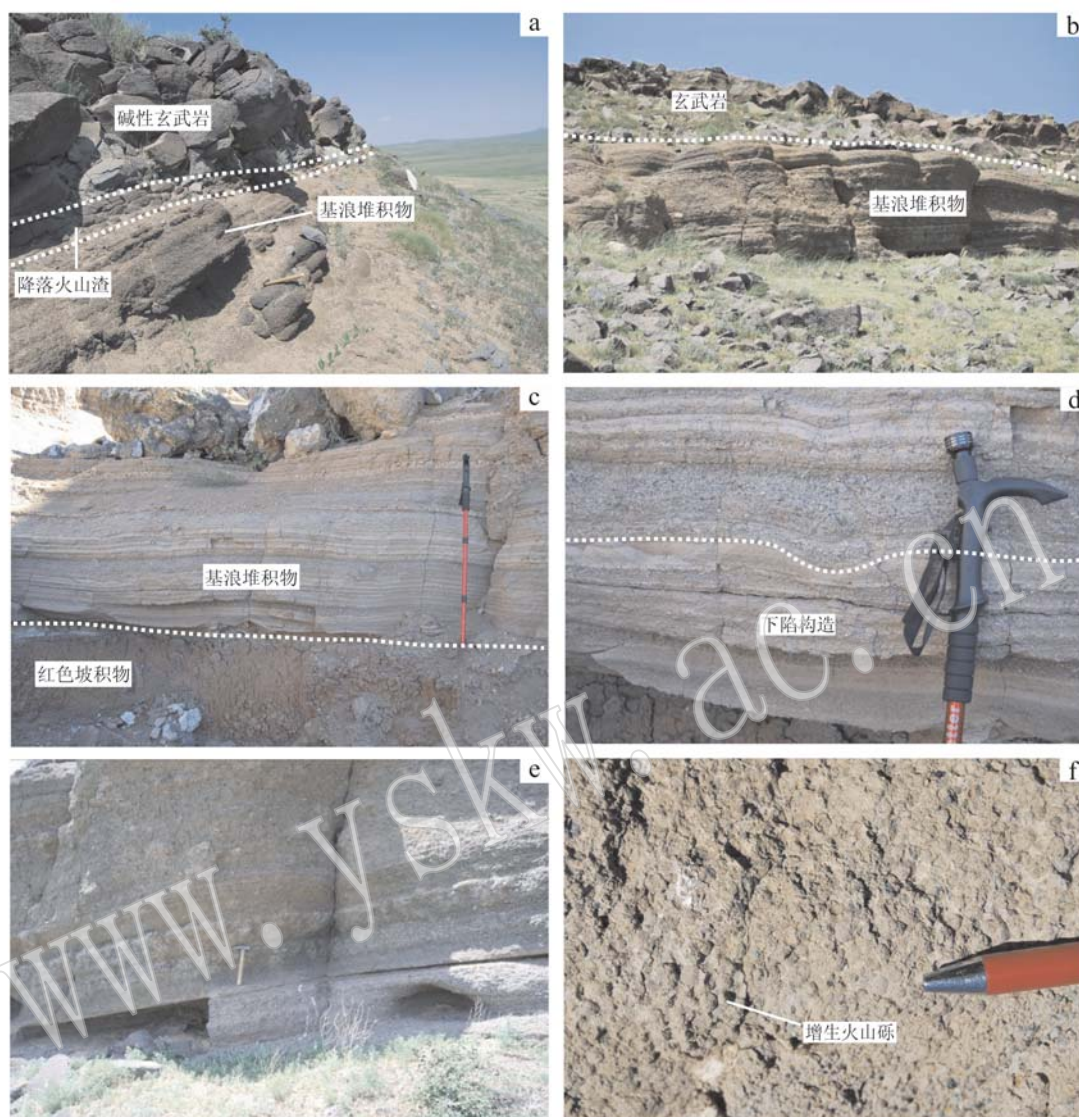


图6 基浪堆积物特征

Fig. 6 The features of base surges

a—玄武岩、降落火山渣与基浪堆积物的接触关系; b—玄武岩与基浪堆积物的接触关系; c—具有平行层理的基浪堆积物与红色坡积物的接触关系; d—下陷构造(王锡娇等, 2012); e—大型低角度交错层理; f—增生火山砾(王锡娇等, 2012)

a—the contact relation between basalt, falling scoria and base surges; b—the contact relation between basalt and base surges; c—the contact relation between red slope deposits and base surges with parallel bedding; d—sag structure (Wang Xijiao *et al.*, 2012); e—large low angle cross-bedding; f—accretionary lapilli (Wang Xijiao *et al.*, 2012)

质基质组成,并发育一系列平行层理、大型低角度交错层理、韵律层理和下陷层理等构造(图6c、6d、6e)(王妍,2011)。碎屑物主要为玄武质火山渣和围岩碎屑,含量为50%~75%,粒径为0.5~6.0 cm,随与火山口距离的增大而减小。此外,在低平火山锥外缘的基浪堆积物中可见典型的球粒状增生火山砾(图6f),含量为30%~55%,平均粒度为0.5 cm,粒径在一定程度上随着与火山口距离的增

加而变大。

1.3.1 浩特乌拉火山

浩特乌拉火山位于别力古台镇南部,距阿巴嘎旗南东约22 km,地理坐标为E115°8'18",N43°50'30"。该火山的外轮山海拔为1 230 m,内轮山海拔为1 240 m,且双环均呈圆形,是中国乃至全球最典型的双环复合火山。外环属于晚更新世中期的玛珥式火山锥,锥体高约40 m,直径约3 km,火山口

规模较大,直径长达1.5 km,且被2~5 m厚的全新统湖相含砂砾的泥质沉积物所覆盖,锥体坡度为13°,火山口坡度为8°。内环是由2个相互叠置的晚更新世晚期椭圆形降落-溅落锥构成的中心叠置锥,高约80 m,整体直径约1.2 km,锥体坡度为25°,火山口坡度为30°,呈外缓内陡。

浩特乌拉火山是一个复合火山作用的产物,其活动时代大致分为2个阶段,并且每个阶段又包含了多期火山喷发。根据火山结构特征(图7),自低平火山口中心向外依次为全新统湖积泥质沉积物、砖红色溅落堆积熔结集块岩、全新统风成沙土与冲积砂砾石、晚更新世中期第2单元碱性橄榄玄武岩、晚更新世中期基浪堆积物和第1单元碱性橄榄玄武岩。晚更新世中期,深部高温岩浆沿基底断裂上侵,并对浅地表含水层加热,使地下水不断汽化、增压,最后发生强烈的爆炸,形成典型的玛珥式低平火山锥和分布于浩特乌拉火山外轮山一带的基浪堆积物。晚更新世晚期,随着上侵岩浆的增多和地下水

的减少,二者相互作用减弱,逐渐转变为岩浆爆发,在低平火山口中心南侧形成由降落-溅落堆积物构成的火山锥,并有大量玄武质岩浆往北、西和东3个方向流去,大面积地覆盖在基浪堆积物之上。在短暂的岩浆活动间歇期之后,低平火山口内再次发生岩浆爆发,在北部形成一个规模比早期锥体大且形态完整的新降落-溅落锥,呈叠瓦状覆盖在南侧火山锥的北缘之上,构成一个中心叠置锥。南侧火山锥长轴为900 m,短轴为450 m,北侧火山锥长轴为1 000 m,短轴为500 m,两锥体的长短轴比均为2。北侧喷火山口喷出的灰黑色降落火山碎渣和砖红色溅落堆积熔结集块岩覆盖于南火山锥北缘溅落堆积物之上,表明构成中心叠置锥的2个降落-溅落锥明显属于前后两期火山喷发的产物,且南侧火山锥形成时代早于北侧火山锥。晚更新世晚期岩浆爆发后,大量含地幔包体的玄武质岩浆从东北和西南溢出口溢出,覆盖在早期形成的基浪堆积物和玄武岩之上,形成以碱性橄榄玄武岩为主的块状熔岩。

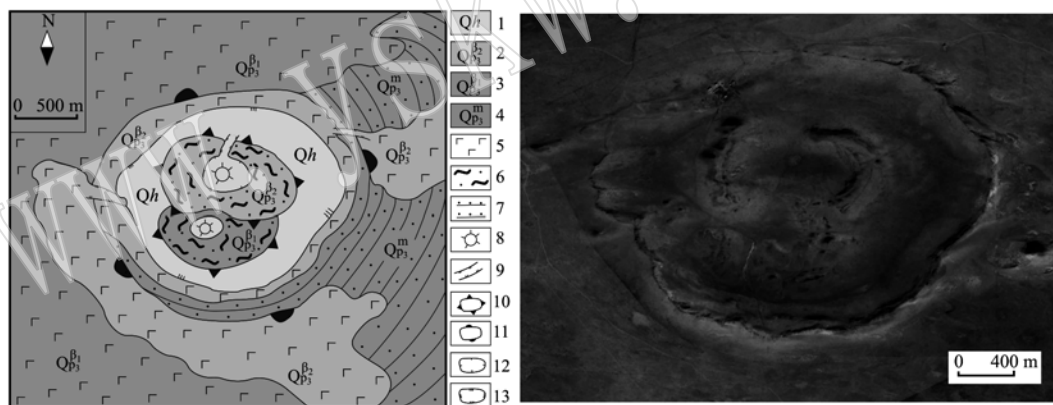


图7 浩特乌拉火山锥体结构地质图(左)与卫星图(右)[据王锡娇等(2012)修改]

Fig. 7 Geological map of the structure(left) and satellite map(right) of Haotewula volcano(modified after Wang Xijiao *et al.*, 2012)

1—全新统湖积物; 2—上更新统上部玄武岩; 3—上更新统下部玄武岩; 4—上更新统下部火山碎屑物; 5—玄武岩; 6—溅落堆积熔结集块岩; 7—基浪堆积物; 8—喷火口; 9—熔岩溢出口; 10—溅落锥; 11—玛珥式火山锥; 12—火山口; 13—低平火山口

1—Holocene lacustrine deposits; 2—the top of upper Pleistocene basalt; 3—the middle of upper Pleistocene basalt; 4—the bottom of upper Pleistocene tephra; 5—basalt; 6—splash down accumulation of welded agglomerate; 7—base surges; 8—bocca; 9—lava vent; 10—spatter cone; 11—a cone of Maars; 12—crater; 13—low crater

1.3.2 额斯格乌拉与车勒乌拉火山

额斯格乌拉和车勒乌拉火山均位于那仁宝拉格苏木乡东南部,二者相邻,地理坐标为E114°14'23", N44°15'18",距阿巴嘎旗北西约58 km,两者的双环结构并不明显(图8、图9)。额斯格乌拉火山规模极大且结构较为完整,属于内蒙古东部目前最大的玛珥式火山,锥体呈椭圆形,长轴直径约7.8 km,短轴

约6.3 km,长短轴之比为1.2,高度为45 m,整体形态较为平缓,锥体坡度为6°~8°。低平火山口呈圆形,直径约4 km,深度约15 m。火山口内被全新统沼泽-湖泊沉积的淤泥所覆盖,并发育2个积水洼地。火山锥主要由厚层的基浪堆积物、薄层的降落玄武质火山渣、溅落堆积熔结集块岩和碱性橄榄玄武岩组成。

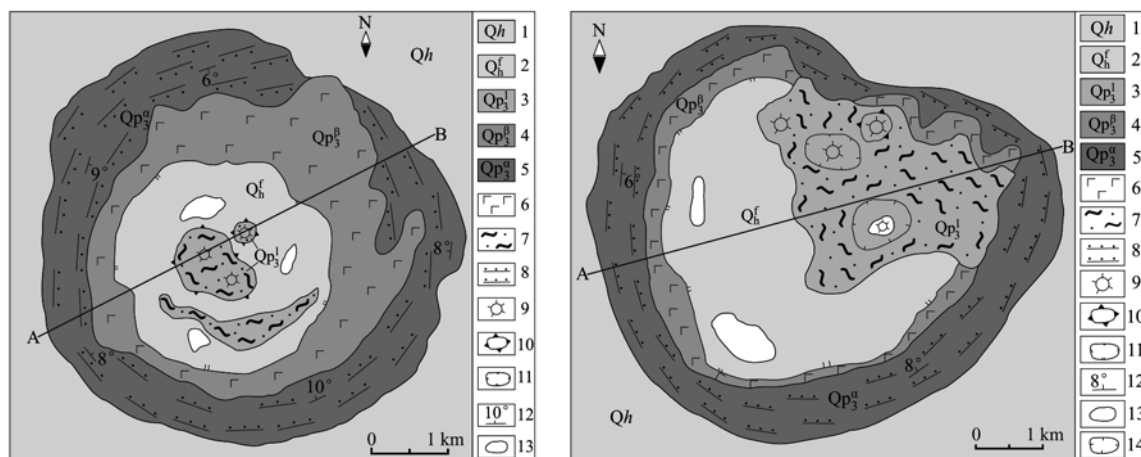


图8 车勒乌拉(左)与额斯格乌拉(右)火山锥体结构地质图[据王锡娇等(2012)修改]

Fig. 8 Geological map of the structure of Chelewula(left)and Esigewula (right) volcanic cone (modified after Wang Xijiao et al., 2012)

- 1—全新统风积沙土、冲积砂砾石; 2—全新统湖沼淤泥; 3—上更新统火山碎屑物; 4—上更新统玄武岩; 5—上更新统基浪堆积物;
6—玄武岩; 7—溅落堆积熔结集块岩; 8—基浪堆积物; 9—喷火口; 10—溅落锥; 11—低平火口; 12—产状; 13—湖泊; 14—火山口
1—the aeolian sand, alluvial sand and gravel of Holocene; 2—Holocene lacustrine sludge; 3—upper Pleistocene tephra; 4—upper Pleistocene basalt;
5—upper Pleistocene base surges; 6—basalt; 7—splash down accumulation of welded agglomerate; 8—base surges; 9—bocca; 10—spatter
cone; 11—low crater; 12—attitude; 13—lake; 14—crater



图9 车勒乌拉(左)与额斯格乌拉火山(右)卫星图

Fig. 9 Satellite maps of Chelewula(left)and Esigewula (right) volcanos

车勒乌拉火山海拔高度为1 162 m,外环锥体呈圆形,直径约6.8 km,高度约55 m,坡度呈西陡东缓,规模也比一般玛珥式火山要大许多。低平火山口呈圆形,直径约2.5 km,深度约40 m,火山口内零星发育若干小湖泊,在雨季多形成季节性湖泊。中心叠置锥由晚期降落火山碎屑物、砖红色溅落堆积的强熔结集块岩和溢流式的碱性橄榄玄武岩组成,发育3个小型喷火山口,整体呈圆形,直径约300 m,

高度约57 m,锥体局部被全新世湖积淤泥所覆盖(图10)。

额斯格乌拉和车勒乌拉火山活动整体划分为2个阶段:晚更新世早期,南侧发生射汽-岩浆爆发,产生大量基浪堆积物,形成额斯格乌拉外环的玛珥式低平火山锥。随着地下水被消耗殆尽,额斯格乌拉火山在晚更新世中期转变为岩浆爆发,产生少量降落堆积的玄武质火山渣、大量溅落堆积的熔结集块岩和溢流碱性橄榄玄武岩,形成内环的中心叠置锥。同时,火山活动中心向北迁移,在北侧发生射汽-岩浆爆发,形成车勒乌拉外环的玛珥式火山锥。晚更新世晚期,车勒乌拉火山活动也转变为岩浆爆发,产生少量降落堆积的玄武质火山渣、大量溅落堆积的熔结集块岩和溢流碱性橄榄玄武岩,形成内环的中心叠置锥。额斯格乌拉火山的整体轮廓不太清晰,溅落堆积的熔结集块岩风化较为严重,而车勒乌拉火山外形完整,保存完好,轮廓清晰。在长时间的风化剥蚀作用下,早期由降落火山渣、溅落熔结集块岩等构成的中心叠置锥不断变矮,再加上火山湖中沉积物充填,额斯格乌拉火山的火山口越来越平坦,双环结构的轮廓也越来越模糊,而晚期的车勒乌拉火山所受的风化剥蚀作用和沉积作用相对较弱,故推测认为额斯格乌拉火山的形成时代早于车勒乌拉火山。

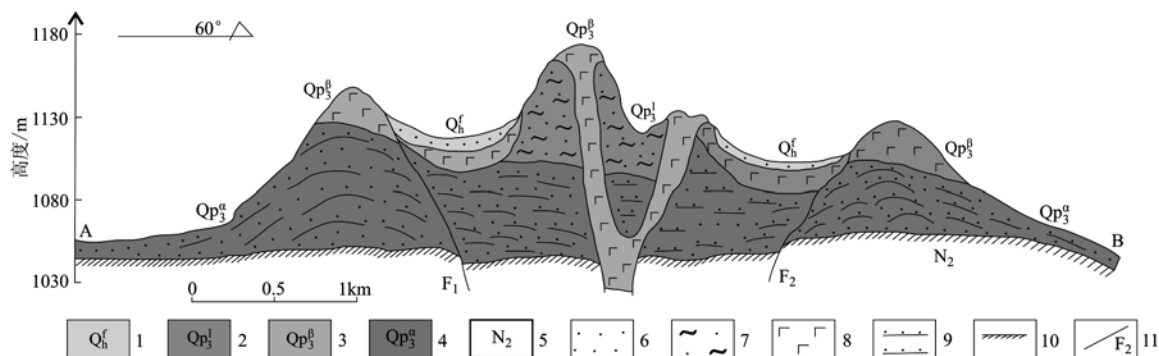


图 10 车勒乌拉火山剖面图[据王妍(2011)修改]

Fig. 10 Cross section of Chelewula volcano (modified after Wang Yan, 2011)

- 1—全新统湖积物; 2—上更新统火山碎屑物; 3—上更新统玄武岩; 4—上更新统火山碎屑物; 5—上新统地层; 6—湖积淤泥; 7—溅落堆积熔结集块岩; 8—玄武岩; 9—基浪堆积物; 10—基底地层; 11—正断层
- 1—Holocene lacustrine deposits; 2—the top of upper Pleistocene tephra; 3—the middle of upper Pleistocene basalt; 4—the bottom of upper Pleistocene tephra; 5—upper Pleistocene strata; 6—lacustrine sludge; 7—splash down accumulation of welded agglomerate; 8—basalt; 9—base surges; 10—foundation bed; 11—normal fault

2 火山活动时代

在确定火山的喷发时代时, ^{14}C 、热释光、裂变径迹、 ^{40}Ar - ^{39}Ar 、K-Ar 和铀系不平衡法是常用的测年方法。但是对于晚第四纪火山而言,由于测试方法和精度的限制,大多数同位素测年方法并不适用,故而无法获取准确的火山喷发时间。同时,不同测年方法对样品的要求有所不同,获取相关样品的难易程度也有所不同。由于玛珥式火山的特殊成因,基浪堆积物中的碎屑物主要是粒径不等的围岩碎屑和玄武质火山碎屑,且围岩碎屑多为早期岩石受爆炸作用破碎而成,部分玄武质火山碎屑是射汽-岩浆爆发过程中由玄武质岩浆经冷凝、固结和炸裂而成,不仅量少,也难以提纯,而后者才是真正的测年对象。因此,获取能够代表玛珥式火山喷发时代的测年样品十分困难。

既然难以对玛珥式火山喷发物进行直接测年,那就需要在野外仔细寻找其它地质证据。对于火山而言,最显著的标志是火山地貌。在风化剥蚀作用下,形成时代不同的火山,其锥体形态通常会发生不同程度的变化,如锥体高度逐渐变低、坡度变缓以及锥体表面出现深度不同的冲蚀沟等现象。一般来说,时代越新,锥体风化降解程度越低,火山机构保存越完整(白志达等, 2012)。因此,火山地貌特征也可以作为火山喷发时代的判断依据。内蒙古东部

晚更新世以前形成的火山,锥体已基本被破坏剥蚀掉,少量残留火山产物零星地分布于火山四周,地貌标志极不明显(白志达等, 2012; 崔晓歌, 2018)。在地形地貌上,一系列锥体形态较为清晰的火山基本都是晚更新世以来形成的(赵勇伟, 2007; 王妍, 2011; 樊祺诚等, 2015)。玛珥式火山多具有低矮的锥体和低平火山口,火山口深度一般不超过 40 m,常被后期火山喷发物所覆盖。虽然内蒙古东部的玛珥式火山锥体受到一定程度的风化剥蚀,但是整体火山机构和形态仍然保存较好,代表射汽-岩浆爆发的基浪堆积物、低平火山口和增生火山砾等要素依旧可见。

在阿尔山-柴河火山群的卧牛泡子和水帘洞以及阿巴嘎火山群的额斯格乌拉和车勒乌拉等火山剖面中,均可见基浪堆积物覆盖于中更新世坡积物之上,并被晚更新世晚期和全新世坡积物所掩盖。同时,还有大量覆盖于中更新世坡积物之上的基浪堆积物被晚更新世中晚期溅落堆积的砖红色、棕褐色强熔结集块岩和灰黑色碱性橄榄玄武岩所覆盖,局部可见降落堆积的薄层玄武质火山渣夹于基浪堆积物和溅落堆积物之间。此外,诺敏河火山群的毕拉河二级阶地玄武岩顶部烘烤层和底部烘烤的沉积砾石层热释光测年结果分别为 $44.25 \pm 3.76 \text{ Ka. B. P}$ 和 $57.3 \pm 4.87 \text{ Ka. B. P}$,基本可以代表诺敏河火山群晚更新世火山活动的年龄(马保起等, 2006)。阿巴嘎火山群的额斯格乌拉火山东侧和车勒乌拉火山中部的晚期溅落堆积物中含有较多高温烘烤的上新世

砂泥岩“包体”,其热释光测年结果均为 $0.112 \pm 0.0096 \text{ Ma. B. P}$ (白志达, 2012)。根据玛珥式火山的地形地貌特征、火山锥体和相关火山喷发物的风化降解程度以及基浪堆积物与其他火山喷发物和第四纪沉积物等岩体之间的叠置关系,结合热释光测年结果,可将内蒙古东部晚第四纪玛珥式火山活动时代暂定为晚更新世早中期。

3 玛珥式火山的成因机制与喷发过程

内蒙古东部火山群中的玛珥式火山都具有相近的喷发时代和相似的火山地质特征,均为晚更新世早中期火山活动的产物,且具有相同的火山喷发序列,总体可分为3期:第1期为射汽-岩浆爆发成因的玛珥式火山,第2期演变为岩浆爆发与喷溢型的降落-溅落锥,第3期逐渐转为岩浆溢流型的玄武质熔岩,表明其活动机制与喷发演化过程也可能类似。玛珥式火山是岩浆与水相互作用而产生射汽或射汽-岩浆爆发的结果,其主要的控制因素为相对封闭体系中水的质量、岩浆溢出率 (Zimanowski *et al.*, 1991; Dellino and Volpe, 2000)。炽热的岩浆与水的相互作用是指:当二者未直接接触时,高温岩浆通过热传递使地下水不断汽化;当二者直接接触时,一方面岩浆会使水汽化,另一方面水会使岩浆冷却,并发生淬火作用 (Mueller *et al.*, 2000; 孙谦等, 2003)。一般情况下,处于相对封闭体系中的水与上侵岩浆的质量比 R_s 介于 $0.1 \sim 1.0$ 之间时容易发生射汽或射汽-岩浆爆发 (Wohletz, 2002; 孙谦等, 2005a)。内蒙古东部零星分布着一系列由早期河湖萎缩、分裂而残留下来的溪流、湖泊,成为相对封闭体系的浅层地下水的重要来源。同时,内蒙古东部广泛分布着具有良好含水性的砾岩、砂岩和粉砂岩和具有良好封闭性的泥岩盖层,如厚约 50 m 的中新统砂砾岩、厚约 30 m 的上新统宝格达乌拉组红色砂岩和灰黑色泥岩盖层、厚约 60 m 的中下更新统砂砾岩和粘土岩 (内蒙古自治区地质矿产局, 1991)。火山区十分发育的断裂构造成为地表水下渗和岩浆上侵的优良通道。丰富的地表水与浅层地下水、良好的含水层与盖层、极为发育的构造裂隙和充足的上侵高温岩浆为射汽-岩浆爆发提供了必要的条件。此外,虽然深部高温岩浆在上侵过程会由于温度和压力的变化而发生出溶作用,并在局部区域形成具有一定压力的挥发分,对射汽-岩浆爆发或多或少会产生一定

的影响。

内蒙古东部玛珥式火山的喷发演化过程整体具有一定的规律性。晚更新世早期,地壳深部沿区域断裂不断上侵的高压高温岩浆使处于相对封闭环境下的地下水不断汽化,并在含水层顶部形成局部高压区 (图 11a)。当气压超过上覆岩体的临界压力值时,浅地表高压区则会发生强烈爆炸,冲破上覆地质体,并产生大量自火山口向外紧贴火山口内壁和地表横向流动的基浪涌流 (图 11b)。若爆炸过程中无岩浆直接参与,碎屑涌流主要为爆破的围岩碎屑、具有一定温度的泥沙质气液混合物,则称该火山作用为射汽爆发。反之,若岩浆直接参与,火山碎屑涌流主要为玄武质岩浆碎屑、爆破的围岩碎屑、具有一定温度的火山灰-泥沙质气液混合物,则称该火山作用为射汽-岩浆爆发。随着基浪涌流运移距离的增大,颗粒粗、比重大的碎屑物在重力作用下先沉积,从而形成自火山口向外碎屑物粒度逐渐减小的分选现象。经过搬运、沉积、固结,乃至成岩作用后,基浪涌流可以形成一系列覆盖于基岩之上的基浪堆积物。此外,在基浪涌流运移过程中,小颗粒碎屑物和气泡不断滚动和凝聚基浪涌流中的火山灰、泥质,从而形成以碎屑物和气泡为核心且具有同心圆层的球粒状增生火山砾。随着与火山口距离的增大,增生火山砾的粒径也一定程度地增大。晚更新世中期,当岩浆充足时,火山活动转变为以岩浆爆发为主,形成具有一定高度的火山喷发柱,并产生少量降落堆积的薄层玄武质火山渣,局部覆盖于早期基浪堆积物之上。若岩浆爆发的规模较大,早期玛珥式火山锥体极易被破坏,从而形成以降落堆积为主的松散火山渣锥。随着岩浆供给不足、岩浆挥发分减少、地下水或地表水不足以及火山通道逐渐畅通,火山活动逐渐转变为喷泉式岩浆喷发,并在火山口附近形成一套高温的溅落堆积物,冷却固结后为砖红色强熔结块岩 (图 11c)。晚更新世晚期,由于火山通道完全畅通,大量碱性玄武质岩浆自火山口溢出,部分覆盖于早中期的基浪堆积物和降落-溅落堆积物之上 (图 11d)。

内蒙古东部火山群中的各个玛珥式火山的锥体低矮,火山口平缓,深度较浅,总体介于 $10 \sim 60 \text{ m}$ 之间。车勒乌拉火山的基浪堆积物和溅落堆积物中含丰富的红色砂岩、灰黑色泥岩碎屑等包体表明内蒙古东部射汽或射汽-岩浆爆发的深度一般较浅,通常不会形成明显的火山喷发柱,而是形成一种自火山

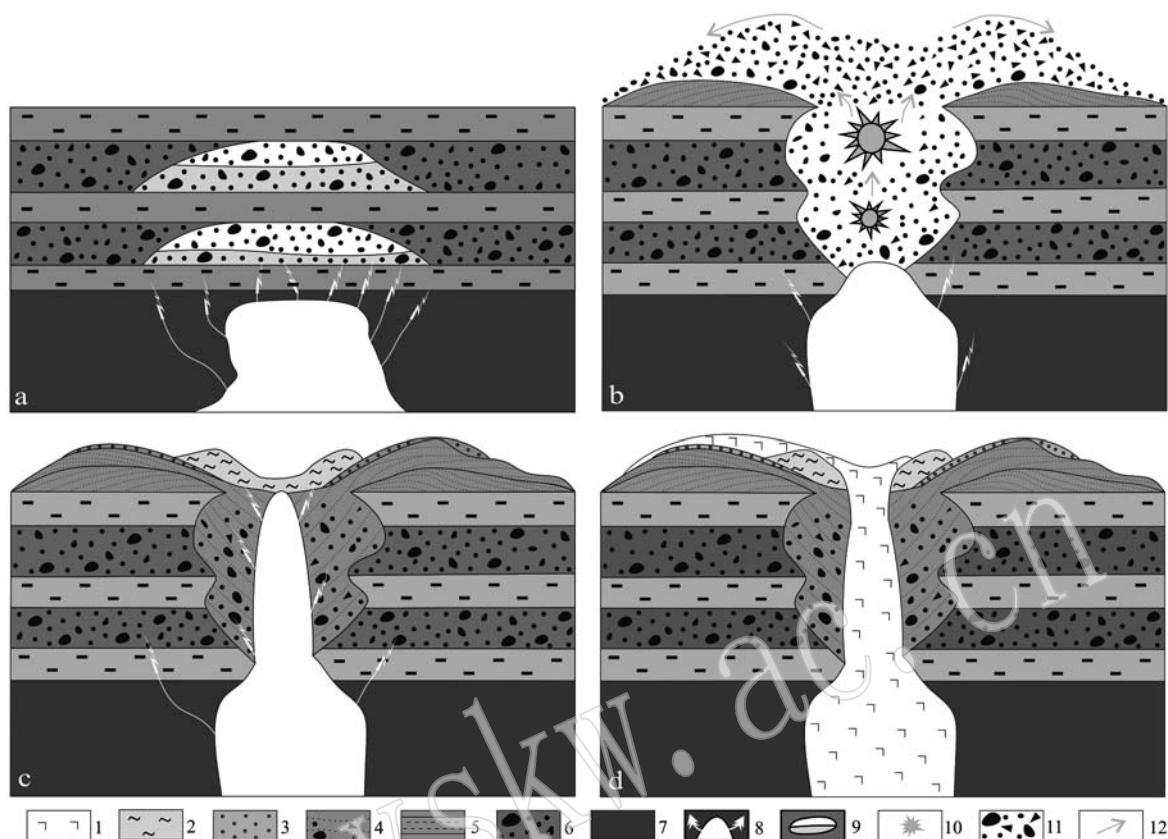


图 11 玛珥式火山演化过程

Fig. 11 The evolution process of Maars

1—玄武岩; 2—灰黑色火山溅落堆积物; 3—棕褐色火山降落堆积物; 4—具有平行层理、大型低角度交错层理等构造的基浪堆积物; 5—泥页岩封闭层; 6—砂砾岩含水层; 7—基底岩层; 8—沿断裂上侵的高温岩浆; 9—相对封闭环境下受高温岩浆加热-汽化的地下水; 10—浅地表射汽-岩浆爆炸点; 11—火山碎屑涌流; 12—涌流方向

1—basalt; 2—the gray-black splash down deposits of volcano; 3—the brown falling deposits of volcano; 4—base surges with parallel bedding, large-low angle cross bedding, etc; 5—the confining bed of shale; 6—sand-gravel aquifer; 7—foundation bed; 8—hot magma intrusion along the fault; 9—groundwater heated by high temperature magma in a relatively closed environment; 10—steam-magma explosion point at shallow surface; 11—pyroclastic flow; 12—the direction of pyroclastic flow

口向四周紧贴地表横向流动的基浪涌浪, 最终堆积形成具有爬升层理、平行层理、大型低角度交错层理等结构构造的基浪堆积物。若岩浆爆炸深度较大, 要么是因能量充足而冲破地表, 产生具有一定高度的火山喷发柱, 形成以降落堆积的玄武质火山渣为主的斯通博利式等火山类型(魏海泉等, 1999; 白志达等, 2006; 曹园园等, 2013); 要么是能量不足以冲破上覆地质体, 形成隐爆岩等岩体(王照波, 2001; 高轲等, 2017), 这两种情况都无法形成玛珥式火山。在早期玛珥式火山形成后, 若玛珥式火山口附近再次形成满足射汽-岩浆爆发所需的条件, 那么在原火山口处也可能再次形成新的玛珥式火山, 从而使玛珥式火山口直径和深度出现一定程度的加

大加深现象(Lorenz, 1986)。此外, 在整个火山活动过程中, 大量岩浆的消耗和残余岩浆的冷却收缩作用也容易在火山口下方形成一定空隙, 因无法承受上覆地质体的压力, 而发生一定程度的塌陷。

4 结语

(1) 内蒙古东部晚第四纪火山活动初期形成了以西热克特奇呼通、卧牛泡子、浩特乌拉、车勒乌拉和额斯格乌拉为代表的玛珥式火山, 分别分布于北东向展布的各个火山群中, 属于晚更新世早中期射汽-岩浆爆发的产物。

(2) 射汽-岩浆爆发所需要的条件较为复杂, 主

要控制因素为处于浅地表相对封闭体系中地下水的
质量、深部上侵岩浆的溢出率。同时,地表水的分布
位置与质量、浅地表含水层与盖层的优良性、区域断
裂构造的发育程度、岩浆中挥发分的出溶率等也会
对射汽-岩浆爆发产生一定的影响。新近纪晚期和
第四纪早期丰富的河湖相地表水是地下水的重要来
源。区域断裂构造的存在为上侵的深部高温岩浆和
进入相对封闭环境的地表水或地下水提供了运移通
道和存储场所。

(3) 射汽-岩浆爆发的深度一般较浅,通常不会
形成明显的火山喷发柱,而是形成紧贴地表向火山
口四周横向流动的基浪涌流,最终堆积形成具有爬
升层理、平行层理、大型低角度交错层理等结构构造
的基浪堆积物和球粒状增生火山砾。由于爆炸深度
浅和火山碎屑物的充填,玛珥式低平火山口的深度
通常为 10 ~ 60 m。若原来的玛珥式火山口附近再次
发生射汽-岩浆爆发作用,则可能会使原低平火山口
的直径和深度加大。

(4) 在同一玛珥式火山中,厚层基浪堆积物、降
落堆积的薄层玄武质火山渣、溅落堆积的熔结集块
岩和碱性橄榄玄武岩之间的叠覆关系表明火山喷发
存在着一定的演化规律,即在整个火山活动过程中,
当满足射汽-岩浆爆发所需条件时,早期一般可以形
成由基浪堆积物构成的玛珥式火山;随着岩浆增多、
地下水被消耗殆尽,火山活动中期逐渐演变为以岩
浆爆发为主,形成一系列覆盖于玛珥式火山锥之上
且具有多个喷火山口的降落-溅落锥,甚至可能形成
斯通博利式、布里尼式火山;当岩浆通道完全畅通
时,火山活动晚期沿火山口溢流出的玄武质熔岩流
广泛地覆盖在早期火山喷发物之上,也可能会形成
夏威夷式火山。

致谢 感谢各位审稿专家提出了宝贵的修改意
见。

References

- Bai Zhida, Tan Qingwei, Xu Guiling, *et al.* 2012. Late Quaternary volcanic activity and neotectonics in the eastern Inner Mongolia[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 099 ~ 1 107(in Chinese with English abstract).
- Bai Zhida, Xu Debing, Zhang Bingliang, *et al.* 2006. Study on type and phase of quaternary explosive volcanism in Longgang volcanic cluster [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1 473 ~ 1 480(in Chinese with English abstract).
- Cao Yuanyuan, Li Ni and Zhang Liuyi. 2013. A discussion on the welding process of pyroclastic rocks and a review of its present research state both in China and abroad[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(2): 239 ~ 250(in Chinese with English abstract).
- Chu Guoqiang and Liu Jiaqi. 2018. Maar lakes in China and their significance in paleoclimatic research[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 34(1): 4 ~ 12(in Chinese with English abstract).
- Cui Xiaoge. 2018. Study on Volcano Degradation Process and Volcanic Geology of Yanshan in Arxan Volcanic Field, Inner Mongolia(Master Degree Thesis)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~ 69(in Chinese with English abstract).
- Dellino P and Volpe L L. 2000. Structures and grain size distribution in surge deposits as a tool for modelling the dynamics of dilute pyroclastic density currents at La Fossa di volcano(Aeolian Islands, Italy)[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 96: 57 ~ 78.
- Fan Qicheng, Sui Jianli and Liu Ruoxin. 2001. Sr-Nd isotopic geochemistry and magmatic evolutions of Wudalianchi volcano, Tianchi volcano and Tengchong volcano[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 20(3): 233 ~ 238(in Chinese with English abstract).
- Fan Qicheng, Sui Jianli, Liu Ruoxin, *et al.* 2002. Periods of Quaternary volcanic activity in Longgang area, Jilin Province[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 495 ~ 500(in Chinese with English abstract).
- Fan Qicheng, Zhao Yongwei, Chen Shengsheng, *et al.* 2015. Quaternary volcanic activities in the west of the Daxing'anling-Taihangshan gravity lineament[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(4): 674 ~ 681(in Chinese with English abstract).
- Fan Qicheng, Zhao Yongwei, Sui Jianli, *et al.* 2012. Studies on quaternary volcanism stages of Nuomin river area in the Great Xing'an range: Evidence from petrology, K-Ar dating and volcanic geology features [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1 092 ~ 1 098(in Chinese with English abstract).
- Gao Ke, Tang Juxing, Song Yang, *et al.* 2017. Genesis of magmatic rocks of crytoexplosive breccia in the Naruo deposit of Tibet: Evidence from zircon Hf isotope[J]. *Geology and Exploration*, 53(2): 207 ~ 216(in Chinese with English abstract).
- Geology and Mineral Resources Bureau of the Inner Mongolia Autonomous Region. 1991. Regional Geology of the Inner Mongolia Autonomous Region[M]. Beijing: Geological Press, 1 ~ 725(in Chinese with English abstract).
- Guo Zhengfu, Liu Jiaqi, Chu Guoqiang, *et al.* 2002. Composition and origin of tephra of the Huguangyan maar lake[J]. *Quaternary Sciences*,

- 22(3): 266 ~ 272 (in Chinese with English abstract).
- Kokelaar P. 1986. Magma-water interactions in subaqueous and emergent basaltic volcanism[J]. *Bulletin of Volcanology*, 48(1): 275 ~ 289.
- Kosik S, Nemeth K, Kereszturi G, *et al.* 2016. Phreatomagmatic and water-influenced strombolian eruptions of a small-volume parasitic cone complex on the southern ring plain of Mt. Ruapehu, New Zealand: Facies architecture and eruption mechanisms of the Ohakune volcanic complex controlled by an unstable fissure eruption[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327: 99 ~ 115.
- Liu Jiaqi, Negendank J F W, Wang Wenyuan, *et al.* 2000. The distribution and geological characteristics of maar lakes in China[J]. *Quaternary Sciences*, 20(1): 78 ~ 86 (in Chinese with English abstract).
- Lorenz V. 1973. On the formation of maars[J]. *Bulletin of Volcanology*, 37: 183 ~ 204.
- Lorenz V. 1974. Vesiculated tuffs and associated features[J]. *Sedimentology*, 21: 273 ~ 291.
- Lorenz V. 1975. Formation of phreatomagmatic maar-diatreme volcanoes and its relevance to kimberlite diatremes[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 9: 17 ~ 27.
- Lorenz V. 1986. On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings[J]. *Bulletin of Volcanology*, 48: 265 ~ 274.
- Lorenz V. 2003. Maar-Diatreme volcanoes, their formation and their setting in Hard-rock or Soft-rock environments[J]. *Geotitles*, 15: 72 ~ 83.
- Ma Qibao, Lu Haifeng, Wang Xiaodong, *et al.* 2006. Preliminary chronological constraint of the eruption of the Nuomin river volcanoes group in the Daxing'anling Mountains[J]. *Quaternary Sciences*, 26(2): 295 ~ 296 (in Chinese with English abstract).
- Moore J G. 1967. Base surge in recent volcanic eruption[J]. *Bulletin of Volcanology*, 30: 337 ~ 363.
- Mueller W U, Garde A A and Stendal H. 2000. Shallow-water, eruption-fed, mafic pyroclastic deposits along a paleoproterozoic coastline: Kangerluluk volcano-sedimentary sequence, southeast Greenland[J]. *Precambrian Research*, 101: 163 ~ 192.
- Sun Qian and Fan Qicheng. 2005a. Dynamic mechanism of phreatomagmatic eruption in northern Hainan island[J]. *Seismology and Geology*, 27(1): 63 ~ 72 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qian and Fan Qicheng. 2005b. Study progress on volcanic phreatomagmatic eruption[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 21(6): 1 709 ~ 1 717 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qian, Fan Qicheng, Long Anming, *et al.* 2006. Nanwan volcano eruption features on Weizhou island, Guangxi[J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 31(1): 66 ~ 70 (in Chinese with English abstract).
- Sun Qian, Fan Qicheng, Wei Haiquan, *et al.* 2003. Preliminary study on late pleistocene phreatomagmatic eruptions in northern Hainan island[J]. *Seismology and Geology*, 25(2): 289 ~ 297 (in Chinese with English abstract).
- Tu Zhimin. 2010. Research on Volcanic Cluster of the Quaternary Period in Nuominhe Region (Master Degree Thesis)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~ 59 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fusheng, Zhang Zhaochong and Li Shucui. 2004. Melt structure of Jingpohu Holocene volcanic rocks and its relation to some magmatic dynamics[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 23(4): 313 ~ 317 (in Chinese with English abstract).
- Wang Xijiao, Bai Zhida, Tan Lin, *et al.* 2012. Maars in Xilinhot-Abaga volcanic cluster[J]. *Seismology and Geology*, 34(3): 440 ~ 448 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yan. 2011. Quaternary Volcanic Activity and The New Structure, Xilinhot, Inner Mongolia (Master Degree Thesis)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~ 63 (in Chinese with English abstract).
- Wang Zhaobo. 2001. Discussion of crytoexplosive rocks and the formation model[J]. *Contribution to Geology and Mineral Resources Research*, 16(3): 201 ~ 205 (in Chinese with English abstract).
- Wei Haiquan, Bai Zhida, Hu Jiuchang, *et al.* 2003. Nomenclature of the holocene volcanic systems and research on the textural parameters of the scoria cones in northern Hainan island[J]. *Seismology and Geology*, 25(supplement): 21 ~ 32 (in Chinese with English abstract).
- Wei Haiquan, Liu Ruoxin, Fan Qicheng, *et al.* 1999. Monogenetic volcanism in Longgang volcano clusters[J]. *Geological Review*, 45(supplement): 325 ~ 331 (in Chinese with English abstract).
- Wohletz K H. 2002. Water-magma interaction: Some theory and experiments on peperite formation[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 114: 19 ~ 35.
- Xu Debing, Bai Zhida, Zhang Bingliang, *et al.* 2005. Characteristic and genetic mechanism of pyroclastic base surge deposits of volcanic swam in Longgang area, Jilin province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 60 ~ 66 (in Chinese with English abstract).
- Yoon S W, Yoon S H, Sohn C, *et al.* 2017. Records of palaeo-sea level and eruption duration in a coastal tuff ring, Jeju Island, Korea[J]. *Terra Nova*, 29(1): 52 ~ 60.
- Yu Hongmei, Zhao Bo, Wei Feixiang, *et al.* 2015. Petrological and geochemical characteristics of quaternary volcanic rocks in Haixing area, eastern north China[J]. *Seismology and Geology*, 37(4): 1 070 ~

1 083(in Chinese with English abstract).

Zimanowski B, Frohlich G and Lorenz V. 1991. Quantitative experiments on phreatomagmatic explosions[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 48: 341 ~ 358.

Zhao Yongwei. 2007. Study on Tectonic Quaternary Volcanoes in Arshan-Chaihe Area, Inner Mongolia(Master Degree Thesis)[D]. Beijing: China University of Geosciences, 1 ~ 66(in Chinese with English abstract).

China Geological Survey. 2004. Description of Geological Map of People's Republic of China[M]. Beijing: China Map Press, 226 ~ 230(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

白志达, 谭庆伟, 许桂玲, 等. 2012. 内蒙东部晚第四纪火山活动与新构造[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 099 ~ 1 107.

白志达, 徐德兵, 张秉良, 等. 2006. 龙岗火山群第四纪爆破式火山作用类型与期次研究[J]. *岩石学报*, 22(6): 1 473 ~ 1 480.

曹园园, 李 竟, 张柳毅. 2013. 关于火山碎屑岩熔结过程的讨论及国内外研究现状综述[J]. *岩石矿物学杂志*, 32(2): 239 ~ 250.

储国强, 刘嘉麒. 2018. 中国玛珥湖及其研究意义[J]. *岩石学报*, 34(1): 4 ~ 12.

崔晓歌. 2018. 内蒙阿尔山岩山火山地质与火山锥降解过程研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 1 ~ 69.

樊祺诚, 隋建立, 刘若新. 2001. 五大连池、天池和腾冲火山岩 Sr、Nd 同位素地球化学特征与岩浆演化[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 233 ~ 238.

樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等. 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期[J]. *岩石学报*, 18(4): 495 ~ 500.

樊祺诚, 赵勇伟, 陈生生, 等. 2015. 大兴安岭-太行山重力梯度带以西的第四纪火山活动[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 34(4): 674 ~ 681.

樊祺诚, 赵勇伟, 隋建立, 等. 2012. 大兴安岭诺敏河第四纪火山岩分期: 岩石学、年代学与火山地质特征[J]. *岩石学报*, 28(4): 1 092 ~ 1 098.

高 轲, 唐菊兴, 宋 杨, 等. 2017. 西藏拿若隐爆角砾岩中岩浆岩成因: 来自锆石 Hf 同位素证据[J]. *地质与勘探*, 53(2): 207 ~ 216.

郭正府, 刘嘉麒, 储国强, 等. 2002. 湖光岩玛珥湖火山灰的成分及

其来源[J]. *第四纪研究*, 22(3): 266 ~ 272.

刘嘉麒, Negendank J F W, 王文远, 等. 2000. 中国玛珥湖的时空分布与地质特征[J]. *第四纪研究*, 20(1): 78 ~ 86.

马保起, 卢海峰, 旺小东, 等. 2006. 大兴安岭诺敏河火山喷发时代的初步研究[J]. *第四纪研究*, 26(2): 295 ~ 296.

内蒙古自治区地质矿产局. 1991. 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1 ~ 725.

孙 谦, 樊祺城. 2005a. 琼北射气岩浆喷发力学机制探讨[J]. *地震地质*, 27(1): 63 ~ 72.

孙 谦, 樊祺城. 2005b. 火山射气岩浆喷发作用研究进展[J]. *岩石学报*, 21(6): 1 709 ~ 1 717.

孙 谦, 樊祺城, 龙安明, 等. 2006. 广西涠洲岛南湾火山喷发特征[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 31(1): 66 ~ 70.

孙 谦, 樊祺城, 魏海泉, 等. 2003. 琼北地区晚更新世射气岩浆喷发初步研究[J]. *地震地质*, 25(2): 289 ~ 297.

涂志民. 2010. 诺敏河地区第四纪火山群研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 1 ~ 59.

王福生, 张招崇, 李树才. 2004. 镜泊湖地区全新世火山岩熔体结构及其与某些岩浆动力学过程关系探讨[J]. *岩石矿物学杂志*, 23(4): 313 ~ 317.

王照波. 2001. 隐爆岩及其形成模式探讨[J]. *地质找矿论丛*, 16(3): 201 ~ 205.

王锡娇, 白志达, 谭 林, 等. 2012. 锡林浩特-阿巴嘎火山群内的玛珥式火山[J]. *地震地质*, 34(3): 440 ~ 448.

王 妍. 2011. 内蒙古锡林浩特地区第四纪火山活动与新构造(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 1 ~ 63.

魏海泉, 白志达, 胡久常, 等. 2003. 琼北全新世火山区火山系统的划分与锥体结构参数研究[J]. *地震地质*, 25(增刊): 21 ~ 32.

魏海泉, 刘若新, 樊祺诚, 等. 1999. 龙岗火山群单成因火山作用[J]. *地质论评*, 45(增刊): 325 ~ 331.

徐德兵, 白志达, 张秉良, 等. 2005. 吉林龙岗火山群火山碎屑基浪堆积特征与成因机理[J]. *沉积学报*, 23(1): 60 ~ 66.

于红梅, 赵 波, 魏费翔, 等. 2015. 华北东部海兴一带第四纪火山岩岩石学及地球化学特征[J]. *地震地质*, 37(4): 1 070 ~ 1 083.

赵勇伟. 2007. 内蒙古阿尔山-柴河第四纪火山构造研究(硕士学位论文)[D]. 北京: 中国地质大学, 1 ~ 66.

中国地质调查局. 2004. 中华人民共和国地质图说明书[M]. 北京: 中国地图出版社, 226 ~ 230.