

中国 2007 年以来全新世火山地质研究的主要进展

白志达, 徐德斌, 许桂玲, 王 妍

中国地质大学(北京), 北京 100083

摘要: 简要列举了近年来全新世火山地质领域的研究进展, 主要涉及新确定的全新世火山、精细喷发序列与喷发频率、高分辨率火山机构多维框架研究、火山碎屑物粒度分布、地貌特征与成因、火山碎屑流、涌流和火山泥石流堆积、降落堆积成因亚类、火山活动与新构造和火山地质遗迹资源、环境及火山灾害。

关键词: 全新世火山; 火山地质; 喷发序列; 火山碎屑; 主要进展

中图分类号: P588.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2011)04-0365-10

Progress of Holocene Volcanology Research in China Since 2007

BAI Zhi-da, XU De-bin, XU Gui-ling, WANG Yan

China University of Geosciences, Beijing 100083, China

Abstract: This paper briefly reviewed the main progress of Holocene volcanology research in China since 2007. The review includes eight topics: recently discovered Holocene volcanoes, detailed eruption sequence and frequency, high resolution reconstruction of volcanic edifices, origin, morphology and distribution of volcano clasts, studies of pyroclastic flow, base surge and lahar deposits, subdivision of volcanic fall deposits, volcano eruptions and related structures and resources from volcano relicts and volcano disasters.

Key words: Holocene volcanoes; volcanology; eruption sequences; volcanic clasts; main progresses

火山活动是一种重要的地质作用, 它参与地球各圈层的形成与演化。火山地质学以研究火山活动过程中所发生的一系列地质作用为主要内容, 包括地下深部岩浆通过火山管道喷出地表的过程以及火山产物的堆积定位环境等, 是了解壳幔物质组成、结构与深部过程以及确定大地构造事件的重要途径, 也是火山资源、环境与火山灾害预警研究的基础。近年来, 随着新技术方法的应用和调查研究的不断深入, 在全新世火山地质研究领域取得了长足进展。

1 新确定的全新世火山

全新世火山主要分布在中国东部和青藏高原周边。对全新世火山系统的研究主要始于上世纪 90 年代^[1], 开展了包括火山地质在内的多学科综合研究, 在中国大陆上先后确定的全新世活动火山包括吉林长白山天池、龙岗金龙顶子; 黑龙江镜泊湖、五

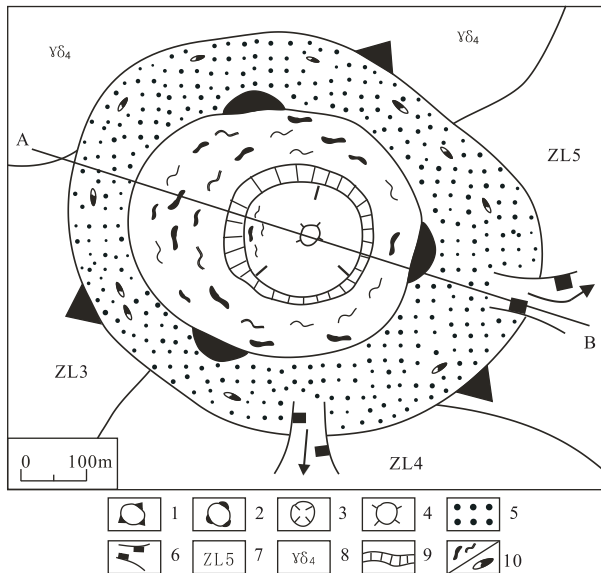
大连池老黑山与火烧山、科洛、二克山、小古里河; 琼北马鞍山-雷虎山; 濠洲岛^[2]; 云南腾冲; 新疆吐鲁番、西天山、阿什、可可西里等。洪汉净等^[3]还对中国全新世火山的危险性等级与活动性进行了初步分类研究。近年来, 在相对较偏远的内蒙古东部鄂伦春自治旗毕拉河、柴河-阿尔山、锡林浩特和乌兰哈达等第四纪火山群内发现并确定有全新世活动火山。在藏北羌塘还发现一系列泥火山^[4]。内蒙古东部全新世火山的发现, 是近年火山地质学研究的重要进展之一。对研究内蒙东部现代地壳深部结构、新构造活动、火山灾害预警以及环境与自然生态和当地经济可持续发展战略研究具有重要意义。

1.1 乌兰哈达全新世火山

乌兰哈达第四纪火山群位于内蒙古中部察哈尔右翼后旗乌兰哈达一带, 地处蒙古高原南缘。构造位置上处于华北地台北缘白乃庙-温都尔庙古陆块

和新元古代陆缘增生带交接处, 新生代属大同-大兴安岭火山活动带南段。火山群面积约 280 km², 分布着不同类型、不同规模的火山约 30 余座。火山分布受 NE 和 NW 向基底断裂控制, 构成特征的裂隙式或裂隙-中心式火山。火山活动主要分为晚更新世晚期(21.05 ± 1.79 ka B. P.) 和全新世两期^[5]。晚更新世主体为裂隙式喷发, 表现为沿基底断裂分布的一系列小型低缓的溅落锥、溅落堤及侵入相熔岩脊。全新世火山包括 3 座炼丹炉和尖山西侧溅落火山锥, 总体呈北东向串珠状展布, 由碱玄质火山渣锥和熔岩流组成。锥体及火口保存完好, 基本未遭受剥蚀。熔岩流裸露, 展布面积约 180 km², 是乌兰哈达第四纪火山群的主体。三座“炼丹炉”的火口浑圆深大, 锥体形如炼丹, 习称“炼丹炉”。从北东到南西依次称北炼丹炉、中炼丹炉和南炼丹炉火山。三座火山的形状、结构组成和活动方式大体一致, 仅规模和喷发先后时序不一。火山活动都经历了早期较强爆发和晚期大规模岩浆溢出过程。早期爆发形成降落渣锥和溅落锥。晚期熔岩流主要为结壳熔岩, 次为渣状熔岩。结壳熔岩流呈黑色、钢灰色, 有些平如流水, 有些波状起伏, 形成独特的熔岩台地地貌景观。熔岩流一般为长 10~18 km, 宽 1~3 km, 厚 5~15 m, 前缘多呈扇形展布, 厚度仅 1~2 m。岩流

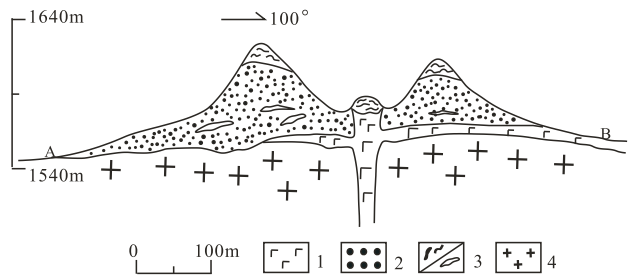
边缘和前缘多见分支岩流, 部分岩流形如大河奔流, 习称“石河”, 有些注入相对低洼地带, 平如湖水, 又称“石湖”。熔岩流表面形态复杂, 有绳状、木排状、面包状等, 其中胀裂谷、塌陷谷和挤压脊发育, 面积与厚度比大, 反映岩浆粘度较小。渣状熔岩流是溢出作用晚期的产物, 规模小, 主要分布于近火口。因受地形制约, 熔岩流主要向东南方向流动, 充填沟谷和低洼地带。在南部和东部, 形成一系列火山堰塞湖(7 个)。火山熔岩流的叠置关系表明, 北炼丹炉和南炼丹炉火山喷发相对较早, 中炼丹炉火山岩浆溢出相对较晚。炼丹炉火山均属斯通博利式, 以中炼丹炉火山为代表: 火山位于乌兰哈达西南 7.5 km, 由碱玄质渣锥和熔岩流组成。火山锥坐落于海西期花岗闪长岩之上, 平面上呈近等轴状, 锥体高约 85 m, 锥底直径为 780~620 m。由早期降落岩渣锥和晚期溅落锥叠置构成(图 1、2), 岩渣锥相对低缓, 下部为黑色浮岩渣块, 粒度较大, 大多为 4~6 cm, 上部为灰黑色浮岩渣, 粒度一般小于 3 cm。晚期溅落锥叠加在渣锥之上, 由褐红、紫红色熔结集块岩组成。火口深约 26 m, 火口沿西高东低, 宽度约 3~10 m。喷火口直径约 70 m, 其上还发育末期活动的穹状火口锥(图 2), 直径 20~30 m。熔岩流从锥体南侧和东部岩浆溢出口流出, 主体向东南流淌, 前缘覆于全新世河流冲积物和沼积物之上, 分布面积约 100 km²。大致可分为五个岩流单元, 1~4 岩流单元主要向南东低洼处流淌, 前缘抵达白音淖一带, 并堰塞三股水形成莫石盖淖和小海子等堰塞湖。熔岩流长约 19 km, 宽度一般 1~3 km, 最窄的熔岩流约 300 m, 厚度一般为 3~10 m。岩流前缘白音淖一带发育熔岩塚及喷气锥, 熔岩塚总体呈馒头状, 高度 3~10 m 不等, 直径一般为 10~30 m, 个别达 50 m, 其上发育特征的放射状张裂隙。第 5 熔岩流单元主要向东、西两侧流淌, 规模小, 为火山活动晚期的渣



1. 降落火山锥; 2. 溅落火山锥; 3. 火口; 4. 火口锥; 5. 火山渣;
6. 熔岩流溢出口; 7. 中炼丹炉熔岩流; 8. 海西期花岗闪长岩; 9. 火口垣; 10. 熔岩饼/火山弹
1. fallen cinder cone; 2. spatter cones; 3. crater; 4. crater cone;
5. cinder; 6. magma overflow exit; 7. Lava flow of the Middle Cupola;
8. Variscan granodiorite; 9. crater edge; 10. lava pie/ volcanic bomb

图 1 中炼丹炉火山锥体地质图

Fig. 1 Geological map of the cone, Middle Cupola



1. 玄武岩; 2. 火山渣; 3. 熔岩饼/火山弹; 4. 华力西期花岗闪长岩
1. basalt; 2. cinder; 3. lava pie/ volcanic bomb;
4. Variscan granodiorite

图 2 中炼丹炉火山剖面图

Fig. 2 Section of Middle Cupola

状岩流。中炼丹炉火山活动首先是较强爆发,高度碎屑化的岩浆碎屑物被喷向高空,然后在重力作用下降落,形成规模较大的降落火山渣锥。岩浆上升通道打开后,随着岩浆中挥发分的减少、岩浆上升速度加快以及火口开放所造成压力的骤减,火山爆发强度减弱,发生溅落堆积,碎屑化程度很低的高温塑性熔浆碎屑溅落在火口沿上,堆积并相互焊接,形成熔结集块岩或碎成熔岩,使火口垣不断加高,形成陡峭的溅落火山锥。溅落堆积后,由于挥发分急剧减少,岩浆溢出率快速提高,火山作用方式转为溢流式;岩浆沿着碎屑锥体底部与基底接触面处的中性浮力界面形成岩浆溢出口,溢出大量熔岩,形成多股熔岩流。由早而晚熔岩流规模减小,渣状熔岩流的溢出,暗示火山活动已接近尾声,火口锥的出现,标志着炼丹炉火山活动基本结束。

乌兰哈达全新世火山活动总体有自北东向南西迁移的特点。火山锥、火山口和熔岩流基本未遭受风化剥蚀,熔岩流覆盖在全新世河谷砂砾石、风成沙和沼泽沉积物上,表明火山喷发时代应为全新世。

1.2 锡林浩特鸽子山火山

鸽子山火山处于锡林浩特-阿巴嘎第四纪火山群,位于锡林浩特市东南规模大,面积约 9300 km²,分布着约 284 座火山。火山活动具有多期性,晚更新世为活动的鼎盛时期。鸽子山火山是全新世火山的典型代表,由火山渣锥、碎屑席和熔岩流组成。锥体形态完整,雄伟壮观。火口经历多次塌陷而成为破火口。火山锥由降落火山渣和溅落熔结集块岩组成。锥体形如倒钟,平面形态为椭圆状,长轴直径约为 1.5 km,短轴为 1.2 km,高度为 110 m,锥体外坡角为 25~30°。降落的碱玄质火山渣呈黑色、钢灰色,粒度平均在 1~2 cm,大者可达 4~5 cm,含有少量火山弹,呈松散状,构成降落渣锥。溅落熔结集块岩覆于松散火山渣之上,低度碎屑化的塑性熔岩团块、熔岩饼和火山弹溅落在火口沿上,构成直径约 800 m 的溅落锥。锥体西和北东发育岩浆溢出口,西侧溢出口塌陷,使锥体堆积物整体陷落,并在锥脚形成直径约 80 m,深约 30 m 的漏斗状塌陷坑。北东溢出口在岩浆溢出过程中裂解破坏了锥体,裂解后的锥体堆积物被拖曳到 1 km 以外。由于快速喷发,深部岩浆房被抽空,火口发生了多次塌陷作用,形成了典型的破火口,破火口直径约 450 m。破火口内发育火山活动晚期侵出的小型熔岩穹丘,沿环状断裂并有辉绿岩墙侵入。火山早期的爆发活动除形成降落锥外,还形成面积较大的火山碎屑席。火山碎屑席主要分布在鸽子山东南区域,为黑色或灰

黑色火山渣和火山灰,粒径一般 3~7 mm,大者可达 10 mm,且离火山锥越远,粒度越细。在近锥体厚度较大,约 2~3 m,远离锥体逐渐变薄。在距火口约 6 km 的位置,厚度约为 20~25 cm。火山碎屑席的发育反映鸽子山爆发强度较大,在火口之上已形成以浮力上升为主要营力的喷发柱,碎屑席的定向分布反映受当时的季风影响。爆破式喷发作用之后,熔浆自锥体西侧和北东侧溢出口涌出,向地势低洼的南部流淌,充填沟谷和低洼地带。不同期次的熔岩流单元相互叠置,形成规模较大的熔岩台地,覆盖面积约 48 km²。西侧溢出口涌出的熔岩流先向西北流淌,然后在地形的影响下转为向南流动。北侧溢出口溢出的熔岩流绕过鸽子山火山锥体向北东流动,然后也转为向南流淌,并覆盖在西侧溢出口溢出的熔岩流之上。熔岩流类型主要为结壳熔岩,少量为渣状熔岩。结壳熔岩规模较大,形如大河奔流向低洼处流淌,长约 12~16 km,宽约 2~3 km,熔岩流前缘多呈撒开的扇形展布。厚度大多为 10~15 m,前缘多为 1~1.5 m。结壳熔岩表面大多平滑,局部发育绳状、木排状和面包状构造。当较小厚度的熔岩流流经平缓湿地,且接近停滞状态时,常形成喷气锥。鸽子山熔岩流中的喷气锥主要分布于阿敦楚鲁和熔岩流前缘地带,大多数喷气锥保存十分完好,几乎未遭受风化剥蚀(图 3)。一般高度在 40~90 cm 之间,最大者可达 170 cm,直径一般在 3~4 m 之间,小者约 1 m,大者可达 7~8 m。喷气锥上的熔岩呈瓦片状叠置,单层厚度 1~2 cm 左右。渣状熔岩流规模小,仅分布于近火口位置,为喷溢作用晚期的熔岩流。鸽子山火山经历了早期较强烈的爆发,中期溅落堆积和晚期大规模熔岩溢出的喷发过程。火山形貌保存完整,火山锥、破火口和熔岩流基本未遭受风化剥蚀的影响。结壳熔岩流在阿尔都贵



图 3 鸽子山喷气锥

Fig. 3 Fumarolic cone of Gezhishan Mountain

乌拉西侧直接覆盖在全新世风成沙及沼泽淤泥之上,喷发时代无疑为全新世。

1.3 阿尔山-柴河全新世火山

阿尔山-柴河第四纪火山群处于大兴安岭中部^[6,7],分布面积约 1000 km²,发育近 30 座第四纪火山,其中焰山、高山、十号沟盆地、小东沟和子宫山火山为全新世火山。这些火山总体受北东向基底断裂控制,呈串珠状展布。火山多由碎屑锥和熔岩流组成,焰山、高山火山还发育碎屑席。熔岩流类型包括结壳熔岩、渣状熔岩和块状熔岩,以结壳熔岩为主。结壳熔岩中发育保存完好的喷气锥和熔岩塚构造。岩性主要为碱性玄武岩。火山类型主要为斯通博利式,部分为亚布里尼式喷发。这些火山结构完整,基本未遭受剥蚀,熔岩流的展布严格受现代地形制约,沿沟谷流淌,并阻塞哈拉哈河及其支流,改造柴河,形成一系列火山堰塞湖。熔岩流覆盖在全新世的沼积物或河流冲积物之上。在焰山火山锥西南约 400 m 处的火山碎屑席中采到两件碳化木,¹⁴C 年龄距今分别为 1990±100 a B. P. 和 1900±70 a B. P.^[6],属全新世火山。另外,该火山群温泉发育,计有阿尔山、金江沟和柴河卧牛湖温泉等,还存在不冻河。这些温泉总体呈北东向展布,与全新世火山分布一致,受北东向基地断裂控制,反映本区全新世火山是广义的活火山。从不同火山喷溢物相互叠置关系来看,火山活动有自北东向南西迁移的特征。

1.4 毕拉河全新世火山

毕拉河全新世火山位于内蒙古呼伦贝尔市鄂伦春自治旗南部诺敏河火山群内。火山群地处大兴安岭北段东坡,属大同-大兴安岭新生代火山活动带北段。火山活动主要集中于晚更新世(25.19±2.14 kaB. P.)和全新世。火山分布于诺敏河中上游、诺敏河支流毕拉河和甘河支流奎勒河流域。火山岩分布面积约 850 km²,坐落着约 27 座由碧玄岩构成的中心式火山,岩浆直接来自上地幔的部分熔融。火山类型为夏威夷式、斯通博利式、亚布里尼式、玛珥式和复合型。火山活动总体有自北东向南西迁移的规律,奎勒河喷发最早,火山剥蚀最强。毕拉河喷发最晚,火山保存最为完整。全新世火山主要分布在毕拉河流域,包括达来滨呼通、马鞍山、371 和 358 高地等火山。火山锥、火山口和熔岩流均保存完好,基本未遭受风化剥蚀的改造。黑色、钢灰色熔岩裸露,怪石嶙峋,形成壮观的“石海”,其上几乎不发育植被(图 4)。熔岩流沿毕拉河流淌,并堰塞其支流河谷形成如达来滨呼通、达来毕诺等火山堰塞湖。在达来毕诺堰塞湖南侧,熔岩流直接覆盖在全新世冲

积砂砾石之上,表明该套玄武岩是全新世喷发的产物。马鞍山熔岩流与五大连池老黑山(1721~1725 年喷发)熔岩流相似,只因地处大兴安岭深处,尚无历史记载,但火山和熔岩流的形貌特征及与全新世河流沉积物的关系表明,火山喷发属全新世无疑。夏威夷式火山以毕拉河河谷 371 高地火山为代表:熔岩溢出形成一盾状火山,火山坡角仅 2~3°。火口位于 371 高地,表现为低缓的熔岩穹丘,穹丘中心发育浅的陷落坑。熔岩流类型为结壳熔岩,表面多被挤碎形成翻花石,基本无风化层和植被。熔岩流主体向南东和北西两个方向流淌,向北的熔岩流阻挡扎文河,使其倒流,呈倒勾状交汇于毕拉河。向南流淌的熔岩流长约 8 km,改造毕拉河,并堵塞布奇汗南山水系,形成堰塞湖。马鞍山为亚布里式火山,地理坐标为东经 123°9′50″,北纬 49°33′30″。由碎屑锥、碎屑席和熔岩流组成。火山锥是由双火口构成的复合锥,两火口东西排列,均发育岩浆溢出口,中间共用一个火口缘,地貌上状如马鞍,故称马鞍山。锥体高为 246 m,锥底直径东西约 1.5 km,南北约 1 km。面积约 2 km²。东、西火口均呈马蹄形,西火口深 58 m,直径 500 m。锥体主要由较强爆发的降落火山渣构成,锥坡 18~20°。降落渣锥上叠加了溅落堆积的熔结集块岩,构成溅落锥,锥体陡峻,坡度一般为 25~30°,局部约 60°。火山碎屑席在距锥体约 2.5 km 处堆积厚度约 1.5 m,表明在火口之上已形成以正向浮力为驱动的喷发柱。火山渣覆盖在全新世坡积物之上,粒径大小均匀,一般为 1~3 cm,显韵律层理。东火口熔浆溢出的结壳熔岩相对较早,覆盖在火山碎屑席之上。西火口岩浆溢出相对较晚,块状熔岩流从火口中直接涌出,顺势而下,直抵毕拉河河谷,形成壮观的“石塘”(图 4),岩块直径约 1~2 m。熔岩流轴部发育陷落坑,有些深达 2 m。马鞍山早期爆破式火山作用后,火山活动暂时停息,使主火口上部一度堵塞。再次喷发时,在主火口两侧形成两个喷火口,并同时发生溅落喷发,形成两个并列的溅落锥。溅落喷发后,火山活动转为溢流式,近火口块状熔岩流的溢出,标志着马鞍山火山活动进入尾声。达来滨呼通为多期复合型火山,主火口地理坐标为东经 123°10′45″,纬 49°28′50″。火山总体由复合锥体和熔岩流组成,规模大,是大兴安岭地区全新世最大的玄武质火山之一。火山活动首先形成盾形熔岩锥,其上又叠加有溅落锥和一系列寄生火山口。盾形熔岩锥长轴为北北东向,长约 3 km,宽约 2 km,面积约 6 km²,呈椭圆形盾状展布,北坡低缓,坡度 8~10°,南坡较陡,坡度

角 $15\sim 20^\circ$ 。构成熔岩盾的熔岩下部为结壳熔岩,上部主要为块状熔岩流,西侧堵塞毕拉河支流水系,形成水域面积约 4 km^2 的达来滨堰塞湖。盾形熔岩锥上叠加了溅落锥和侵出岩穹,二者呈东西向并列。东侧为溅落锥,由溅落堆积的熔结集块岩构成,锥体底径约 1000 m ,火口直径约 500 m ,喷火口直径约 100 m ,高度约 110 m 。侵出岩穹分布在溅落锥西侧,呈近等轴状,直径约 600 m ,高约 116 m 。在盾形锥体北侧,呈串珠状分布 6 个寄生火山口,火口直径 $100\sim 150\text{ m}$,大者长轴约 300 m ,深度一般 $10\sim 20\text{ m}$,最深约 50 m 。其中部分火口中树木丛生,形成地下火口森林。达来滨呼通火山活动首先是岩浆溢出的造盾作用,形成盾形熔岩锥,随着熔岩溢出的减低,逐渐转为熔岩喷泉式喷发,形成溅落锥。



图 4 马鞍山块状熔岩流

Fig. 4 Lava blocks in Ma'anshan

2 高精度喷发序列与喷发频率研究

火山喷发历史和喷发频率,是火山喷发概率预测和火山灾害评估的基础。研究表明,中国新生代火山群基本都是多期活动的产物^[8~14],有些火山群从中新世、上新世、早更新世、中更新世、晚更新世到全新世均有活动,如内蒙阿巴嘎-锡林浩特火山群。有些火山群活动从更新世到全新世,如龙岗、琼北和乌兰哈达等火山群。即使一座火山也多表现出多世代、多期次喷发^[5]。从火山地质入手,应用火山物理学、化学、高分辨率遥感以及地球物理和钻探揭露^[13]等方法,进行高精度大比例尺火山地质填图研究,首先建立一座火山的喷发序列,进而根据不同火山机构之间的相互关系及组合形式,开展系统的对比研究,建立整个火山群的喷发序列。结合多种同位素方法测年、地形地貌^[15]、火山锥体的风化降解程度,以及据火山碎屑物的风化特征、粘土化、火山玻璃水化层厚度等相对年代学研究^[16]和史料记载

等,确定喷发序列的具体时限。如长白山天池火山活动持续时间很长^[13, 17~19],大体可以分为 3 个阶段。早期活动开始于上新世,岩浆演化顺序是粗面玄武岩-粗面岩(2.14 Ma)。中期阶段为早更新世(0.81 Ma 和 0.92 Ma)—中更新世,岩浆从玄武质演化到粗面岩和粗安岩。晚期阶段从晚更新世到全新世,岩浆从玄武岩演化到粗面岩直至碱流岩。尤其是通过综合研究基本建立了天池火山距今 5000 年来的高精度喷发序列。除了著名的千年大喷发外,通过天池火山东侧近代喷发与次生堆积物钻孔揭露研究,在千年大喷发堆积物之下发现了确切的早于千年大喷发的大规模喷发堆积物,在两期喷发物之间发现了可证明喷发间断的地表淤泥层。在淤泥层底部和顶部测得的炭化木年龄分别为 2040 B. P. 和 1065 B. P.^[13]。可见全新世期间天池火山千年大喷发之前还存在着大规模碱流质岩浆爆破性喷发过程。另外,史料还记载了 1668、1072 和 1903 年等小规模喷发^[20],这些活动基本都找到了相应的喷发堆积物,如天池南坡 4 号界碑东侧和北坡天文峰一带,千年大喷发的灰白色碱流质浮岩之上,覆盖着黑色粗面质熔结凝灰岩^[8],可以看作是千年大喷发后活动的直接证据。杨清福等^[21]在天池水面东北侧识别出了一套灰色火山碎屑堆积物,覆盖在 1668 年的火山空降堆积之上。推定为 1903 年喷发产物。这些成果表明长白山天池火山活动的频率大致为千年左右。对一座火山过去喷发历史追溯得越久远,喷发期次识别的精度越高,火山喷发的概率预测就越可靠。因此,高精度喷发序列的建立始终是火山地质研究的重要课题之一。

3 高分辨率火山机构多维框架研究

火山作用在时间和空间上是不连续性的,火山作用的方式具有多样性,物质成分复杂而多变。火山堆积物在空间分布上是局限的,堆积物产状的局部性、不稳定性以及不协调性普遍存在。因此,以火口为参照,从研究岩性、岩相及相序入手,进行大比例尺立体火山制图。系统研究火山产物成因类型,开展对不同成因类型堆积物空间结构特征及相互关系的调查研究,获取堆积物的有关几何参数和形成过程中的动力学参数。建立高分辨率火山机构多维框架,为火山喷发类型、厘定火山喷发序列、火山年代学、恢复火山喷发物理学过程以及火山资源与灾害等基础火山地质研究提供高分辨率的火山机构格架。近年来对长白山天池^[22]、龙岗金龙顶子^[10]、毕拉河马鞍山、柴河-阿尔山焰山^[23]、锡林浩特鸽子山

和乌兰哈达炼丹炉^[5]等全新世火山都进行了高分辨率火山结构构成图的填制。以火山结构构成图为基础,准确限定了火山喷发物的分布范围,估算了喷发物的体积、喷发能量以及一些火山的喷发柱高度,揭示了限定熔岩流长度的主要控制因素^[24]。结合有效的同位素测年手段,综合性地建立了这些火山的空间几何形态、结构组成和精细喷发历史,为探究火山喷发机制,恢复火山喷发行为过程以及火山灾害预警研究提供了必须的多维火山机构框架。

4 火山碎屑物的粒度、形貌与成因

火山碎屑物的研究由定性逐渐转为定量。应用现代分析测试技术,从火山碎屑物的粒度分布、形貌特征、成分以及附着次生矿物入手,并引入数学分形理论研究鉴别不同成因类型火山碎屑物的标型特征。建立区分不同爆发作用火山碎屑物的物理和数学标志,研究不同爆发机制之间的相互转化关系及多成因火山活动过程。为恢复火山喷发过程及火山灾害减轻提供新的途径。近年国内许多全新世火山都进行了较为深入的火山碎屑粒度分布研究,其中研究最多的是长白山天池^[25]、吉林龙岗^[10, 26]和内蒙阿尔山等火山。长白山天池火山碎屑物粒度特征上世纪 90 年代较多学者已作过研究,区分出空降堆积、火山碎屑流堆积和灰云浪堆积不同的成因类型,并根据火山碎屑流堆积剖面上粒度的垂向变化,得出火山碎屑流的搬运营力以层流为主。杨清福等^[17]又对天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积粒度进行了研究。结果表明,火山碎屑流堆积分选差,伴生的灰云浪堆积分选性好。火山碎屑流堆积中的岩屑和浮岩的平均最大粒度随着离开火山口距离的增加而减小,反映火山碎屑流搬运过程中存在重力分选和机械磨损作用。火山碎屑流在搬运过程中又可发生流体化作用。但离火口越远流体化速度越小,反映火山碎屑流在搬运过程中发生过脱气作用,使火山碎屑流的粘度和屈服强度增加而导致堆积。流体化速度是控制火山碎屑流搬运距离的因素之一。刘强等^[26]对龙岗火山群四海火山碎屑席做了进一步研究。再次确定金龙顶子火山为亚布里尼式喷发。粒度累计频率曲线表明碎屑物在空中搬运与沉降时都经过了重力分选过程。近年随着测试技术的提高,对小于 0.005 mm 的细火山碎屑进行粒度分布研究,在区分火山碎屑成因类型上更有意义。碎屑物粒度分数维概念的引入和应用对区分火山碎屑物的成因类型又提供了一种可能^[10],从射汽爆发、射汽-岩浆爆发到岩浆爆发碎屑物的分数维 D

值逐步减小。火山碎屑物的显微形貌特征同样是区分火山碎屑物成因类型的重要手段之一。射汽爆发碎屑物为基底和火山通道周围岩石,碎屑物呈近等轴状,粒径主为砂和粉砂级,碎屑无气孔,表面光滑,石英碎屑颗粒表面多发育塑性擦痕。射汽-岩浆爆发碎屑物,多呈次棱角状、次圆形,粒度变化大,但主要为火山砂和火山砾,岩浆碎屑物气孔表面具有明显龟裂现象,气孔内多有次生附着物。岩浆爆发碎屑物多呈棱角、尖角状、渣状、蜂窝状。碎屑气泡含量多,气泡为管状、卵形和圆形等,部分碎屑表面光滑,但凹凸不平。张秉良等^[16]利用扫描电镜和 X 射线衍射技术研究了天池火山天文峰剖面全新世喷发物中的长石晶屑表面特征和结构状态,结果表明,火山喷发的年代越新,长石有序度越低,其结构状态所记录的温度越高。长石结构状态特征的差异可能与火山喷发的年代、喷发温度有关。

5 火山碎屑流、涌浪和火山泥石流堆积

火山碎屑流、涌流和火山泥石流堆积是火山地质学研究的主要内容之一。在鉴别和区分不同成因类型的基础上,近年来主要侧重堆积相序和相模式的研究。岩相、相序是建立火山地层格架、恢复火山构造面貌和火山喷发过程的基础,相模式对未知堆积相类型的研究、判断火山的剥蚀程度以及恢复火山机构面貌等具有指导和预测作用。

火山碎屑流(pyroclastic flow)是一种富含火山碎屑物和气体的炽热高密度流体,按堆积环境可分陆上及水下两种类型。陆上火山碎屑流包括块灰流、岩渣流和浮岩流堆积。近年研究的重点主要是浮岩流,岩席状浮岩流堆积主要特征是发育流动单元、喷发单元和冷却单元。喷发单元在横向上,由近源到远源,碎屑物组分、粒度、厚度及熔结程度等呈规律性变化,可分为近火口堆积、近源、中源、远源和边缘堆积亚相。在纵向上具有特征的分相性,由下而上可分为布里尼空降堆积、地浪堆积、狭义碎屑流堆积、灰云浪堆积和同浮岩流降落堆积亚相。但在不同区段相序差异较大,近火口下部布里尼空降堆积不稳定,上部为同浮岩流滞后坠落堆积。近源处喷发单元界线大都不清,缺失地浪、灰云浪和同浮岩流降落堆积。与 Wright 等(1980)建立的浮岩流相模式显著不同的是近源厚度反而较薄,中源厚度最大,相序最全,熔结凝灰岩最发育,流动单元和冷却单元也最清晰。地浪主要出现在中远源,灰云浪仅出现在浮岩流的远端。

涌浪是一种稀薄的湍流。据成因类型可分为地

浪(ground surge)、灰云浪(ash cloud surge)和基浪(base surge)。前二者与岩浆爆发的浮岩流伴生出现,是一种干涌浪,分布范围局限。后者是湿涌浪,分布范围较广,可以在火山岩和沉积地层中呈夹层出现,也可单独构筑一座火山,形成玛珥式低平火山。基浪堆积是射汽-岩浆或射汽爆发作用的产物。广分布于雷琼半岛、吉林龙岗、内蒙古阿尔山、锡林浩特等第四纪火山喷发地区^[7,10]。大都构成玛珥式低平火山,堆积物平面上多呈同心环状分布,半径一般在4 km以内。垂向上堆积序列相对较复杂,旋回和韵律明显,多个韵律在垂向上有序叠加构成旋回堆积序列,旋回下部以粗碎屑层占主体,夹少量细碎屑层,平行层理及低角度斜层理发育,上部以细碎屑层为主夹少量粗碎屑透镜体,发育低角度斜层理、丘状层理和槽泊层理。横向上地形表现为不对称的正态曲线样式,火山口内壁相对较陡,火口沿外侧锥坡由陡渐缓,直至快速过渡为低洼的平地。堆积物的产状、厚度、颗粒大小、堆积构造类型也呈规律性变化。火山口内壁堆积物倾向火口,倾角相对较陡,一般为 $30^{\circ}\sim 40^{\circ}$,堆积厚度小,粒度粗,堆积构造以平行层理为主。火口沿产状平缓,厚度最大。火山顺外坡向外倾斜,倾角为 $0^{\circ}\sim 20^{\circ}$,主要发育丘状交错层理、低角度斜层理及冲蚀槽。锥体外产状近于水平,前缘因受古地形影响产状随地形变化而变化,厚度一般为几十厘米,直至尖灭,以细碎屑堆积为主,并发育增生火山砾,平行层理发育,底面平直,偶见冲蚀槽。由于涌浪堆积在结构、构造、堆积特征上与流水沉积物相似,极易混肴,尤其是异常发育的层理构造与沉积岩相似,故近年在区分基浪堆积与流水沉积物方面也取得了重要进展。

火山泥石流主要是火山锥体上松散的火山碎屑物,在喷发动力、重力和雨水综合作用下,形成的巨大混物流体。与普通泥石流相比,火山泥石流是一种热的密度流,是最严重的火山灾害类型之一。聂保锋等^[27]对长白山天池火山泥石流开展了较为系统的堆积相序研究,将火山泥石流从近源到远源划分为:碎屑流相、过渡相和火山泥石流超富集流相。碎屑流相距天池火口64 km以内,碎屑物重量在流体中占80%以上,相应的按体积占60%以上。碎屑物大小混杂,含大量1~2.5 m的巨砾,浮岩碎屑局部集中成透镜状,层理不发育。过渡相距天池火口64~83 km,为火山泥石流的碎屑流向火山泥石流的超富集流转变的过渡区。剖面上具可分性,层理较发育,粒径变化在10~60 cm之间。超富集流相分布于距天池火口83 km以外的河流下游,碎

屑物质量在流体中占40%~80%,相应的体积占比为20~0%。表现为火山砂和浮岩碎屑互层,总体发育面状水平层理,局部显现逆递变粒序层理。

6 降落堆积的成因亚类研究

岩相类型的划分趋于细化,并向成因类型研究转变。如降落堆积进一步分为空落堆积与溅落堆积,这对反演火山爆发方式、火山灾害预警研究具有实际意义。溅落堆积(spatter deposit)是岩浆低度碎屑化的产物。火山以熔岩喷泉式活动,喷出大量高温塑性的火山碎屑,溅落在火口沿上,快速堆积形成溅落锥或长垣状溅落堤(spatter cone or rampart)。碎屑物主要是塑性、半塑性的熔岩饼、火山弹和熔浆团块。由于溅落碎屑物温度较高,故多形成熔结火山碎屑岩,熔结程度在垂向相序上具有对称或偏对称性。熔结程度高时宏观岩貌上与熔岩相似,成为碎成熔岩。近年来在我国东部全新世火山中鉴别出大量玄武质溅落堆积,为确定火山喷发方式提供了重要的岩相学资料。另外,对常见的地幔岩包体的研究获得了地幔源区性质和岩浆起源深度等重要信息^[8,28]。空落堆积(air-fall deposits)指碎屑物受气流作用在空气介质中搬运,当风速改变时受自身重力作用而降落到地表堆积的火山碎屑。根据成因及岩相组合特征又可分为几个亚相:①喷发柱火山碎屑物空落堆积(eruption plumes air-fall deposits):酸性、中酸性火山碎屑由喷发柱气流携带上升到扩散区后沿水平运移扩散,并在自身重力作用下分散降落堆积。形成分布较广的凝灰岩。堆积厚度不受地貌单元限制,总体呈层状产出,厚度变化不大,在距火口约1/3的位置相对较大。②同浮岩流火山灰空落堆积(co-ignimbrite ash air-fall deposits):是与浮岩流紧密相伴的火山灰空落堆积物。火山灰主要有两个来源,一是持续的喷发柱顶部水平扩散的细粒物质,二是从浮岩流中逃逸漂浮的细火山灰。堆积在浮岩流单元的顶部,呈层状、似层状,厚度较小,几乎均由细火山灰组成,富玻屑。纵向上分相不明显,横向上近火口处不发育,在中远源延伸比较稳定。③火山渣空落堆积(scoria air fall):主要是斯通博利式或亚布里尼式喷发作用的产物,成分单一,主要为基性岩浆碎屑。堆积物形成降落渣锥或碎屑席,碎屑席平面上多呈椭圆形或扇形,厚度一般近火口较大,远离火口变薄。碎屑物为火山渣块(火山砾)、火山砂和火山灰。粒径自火口向外逐渐变细。近源处多具粒序层理,中远源层理不明显。我国东部全新世火山中许多火山都发育火

山渣空降堆积物。如内蒙乌兰哈达炼丹炉降落锥,由粗粒黑色火山渣层和钢灰色中细粒火山渣韵律性堆积构成。当爆发强烈时,火口之上会形成以浮力上升为主营力的喷发柱,使碎屑物在高空受风力和重力作用下运移降落堆积于火山锥体以外的广大地区,形成碎屑席。如吉林龙岗金龙顶子火山、阿尔山焰山和毕拉河马鞍山等全新世火山,空落的火山渣除形成巨大的渣锥外,还形成大面积的火山碎屑席。金龙顶子全新世晚期厚度大于 1 cm 的火山碎屑席分布面积约 180 km²,若忽略厚度小于 1 cm 及其漂浮损失火山灰的体积,堆积物体积约 0.07 km³。碎屑席平面上呈扇形向东伸展,反映火山碎屑物的降落受重力和定向风力共同控制。

7 火山活动与新构造

火山是地球内部构造运动和物理化学变化的最直接产物,是了解地下深处物质物理化学性质及构造动力学的天然窗口。全新世火山活动是新构造活动的具体表现形式之一,中国大陆内部活动火山主要与板内热点与拉张构造环境有关,或间接与板块碰撞、俯冲作用有关。不少全新世火山都具有火山喷发有利的构造环境,另一方面通过全新世火山的研究,可直接获取新构造的信息。如阿尔金断裂带中的多期火山作用是断裂带多次强烈活动的证据之一^[29]。在阿尔金断裂弧形转折部位出露的阿什库勒第四纪火山岩群中,全新世火山位于阿什库勒拉分盆地南侧与走滑断裂相伴的张剪性断裂带中,火山的空间分布充分反映了断裂带全新世活动的特征。腾冲火山群位于印度板块向北和向东碰撞带交界的雅鲁藏布大拐弯附近,全新世以来活动的火山有黑空山、马鞍山、打鹰山和老龟坡等,火山区水热活动强烈^[30],表明全新世构造活动仍很激烈。内蒙古乌兰哈达全新世火山,严格受基底断裂控制^[5]。火山的空间排列,反映了该区全新世新构造活动的基本特征,这对研究蒙古高原南缘区域新构造活动特征提供了重要依据。另外,不同火山群的空间分布,反映了区域构造活动的性质。如中国东部靠内陆一侧的北东向大同-大兴安岭新生代火山活动带,全新世火山北起鄂伦春毕拉河马鞍山,经阿尔山-柴河焰山、锡林浩特鸽子山、乌兰哈达炼丹炉直至大同火山群,火山喷发物均为碱性玄武岩。火山的分布及岩石性质表明该带仍处于裂谷初期活动阶段。

8 火山地质遗迹资源、环境及火山灾害

火山作用与资源、环境及灾害是火山地质学研

究的又一个热点。我国全新世火山资源丰富,主要包括火山矿产(优质建筑材料)、温泉和火山地貌景观资源,尤其温泉和火山地貌景观是不可再生的火山地质遗迹资源,也是重要的旅游资源。目前我国已对如五大连池、镜泊湖、龙岗、阿尔山、雷琼火山、腾冲火山和涠洲等火山以建立地质公园的形式实施重点保护,并适度加以开发,这为当地环境保护、科学普及与国民经济建设发挥了功不可没的作用。一些新发现的火山也正在着手进行科学保护和合理开发,为科学研究提供永久性基地。近年来,除了继续开展对长白山天池、五大连池、琼北马鞍山和云南腾冲等火山灾害的研究外,还对吉林龙岗、内蒙乌兰哈达等全新世火山开展了火山灾害的实地考察和研究。根据历史喷发行为编制了火山灾害区划图,为未来火山喷发灾害预警研究提供了直接参照,并初步评价了未来可能的火山灾害类型及影响范围。

当今资源、环境、灾害与人类社会可持续发展,是摆在地球科学工作者面前的重要使命,而火山地质学的研究是其中不可或缺的部分。本文简要综述了近年火山地质方面的主要进展,显然总结的内容不可能涵盖火山地质的各个方面,不足之处和没有包括的内容在所难免,只能留给其它方面的作者总结或以后完善。

参考文献 (References):

- [1] 杨经绥, 吴才来, 夏林圻, 樊祺诚, 徐义刚, 徐夕生. 火成岩的 10 年研究进展和未来的挑战[J]. 地质论评, 2009, 55(3): 406-419.
Yang Jingsui, Wu Cailai, Xia Linqi, Fan Qicheng, Xu Yigang, Xu Xisheng. A decade of progress and challenges for the future in Igneous Petrology[J]. Geol. Rev., 2009, 55(3): 406-419. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李昌年, 王方正, 钟称生. 广西北海涠洲岛(含斜阳岛)第四纪玄武质火山岩的地球化学性质及其源区特征[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, 24(1): 1-11.
Li Changnian, Wang Fangzheng, Zhong Chensheng. Geochemistry of Quaternary basaltic volcanic rocks of Weizhou island in Beihai City of Guangxi and a discussion on characteristics of their source[J]. Acta Petrol. Mineral., 2005, 24(1): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [3] 洪汉净, 吴建平, 王庆良, 李克, 赵慈平, 上官志冠, 杨清福, 张桓荣, 刘国明. 中国火山危险性等级与活动性分类[J]. 地震地质, 2007, 29(3): 447-458.
Hong Hanjing, Wu Jianping, Wang Qingliang, Li ke, Zhao Ciping, Shang Guanzhiguan, Yang Qingfu, Zhang Huanrong, Liu Guoming. Volcanic threat levels and classification of volcanic activity in China[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3): 447-458. (in Chinese with English abstract)

- [4] 解超明, 李才, 李林庆, 吴彦旺, 胡配远. 藏北羌塘中部首次发现泥火山[J]. 地质通报, 2009, 28(9): 1319—1324.
Xie Chaoming, Li Cai, Li Linqing, Wu Yanwang, Hu Peiyuan. First discovery of mud volcanoes in central Qiangtang, northern Tibet, China[J]. Geological Bulletin of China, 2009, 28(9): 1319—1324. (in Chinese with English abstract)
- [5] 白志达, 王剑民, 许桂玲, 刘磊, 徐德斌. 内蒙古察哈尔右翼后旗乌兰哈达第四纪火山群[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2585—2594.
Bai Zhida, Wang Jianmin, Xu Guilin, Liu Lei, Xu Debin. Quaternary volcano cluster of Wulanada, right-back-banner, Chahaer, Inner Mongolia[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2585—2594. (in Chinese with English abstract)
- [6] Bai Z D, Tian M Z, Wu F D, Li T J. Yan Shan, Gaoshan—Two active volcanoes of the volcanic cluster in Arshan, Inner Mongolia[J]. Earthquake Reserch in China, 2005, 19(4): 402—408.
- [7] 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 孙谦, 李霓, 杜星星. 大兴安岭哈拉哈河—浑尔河地区第四纪火山活动初步研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2569—2575.
Zhao Yongwei, Fan Qicheng, Bai Zhida, Su Qian, Li Ni, Du Xingxing. Preliminary study on Quaternary volcanoes in the Halaha River and Chaoer River area in Daxing'an Mountain range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2569—2575. (in Chinese with English abstract)
- [8] 樊祺诚. 长白山火山的历史与演化[J]. 资源调查与环境, 2008, 29(3): 196—203.
Fan Qicheng. History and evolution of Changbaishan volcano [J]. Resources Survey Environment, 2008, 29(3): 196—203. (in Chinese with English abstract)
- [9] 樊祺诚, 隋建立, 赵勇伟, 孙谦, 李霓, 杜星星. 大兴安岭中部第四纪火山岩中石榴石橄榄岩捕虏体的初步研究[J]. 岩石学报, 2008, 24(11): 2563—2568.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Zhao Yongwei, Sun Qian, Li Ni, Du Xingxing. Preliminary study on garnet peridotite xenolith of Quaternary volcanic rocks in middle Daxing'an Mountain Range[J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(11): 2563—2568. (in Chinese with English abstract)
- [10] 白志达, 徐德斌, 张秉良, 张焱, 卜景. 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, 2006, 22(6): 1473—1480.
Bai Zhida, Xu Debin, Zhang Binliang, Zhang Tao, Bu Jing. Study on type and phase of Quaternary explosive volcanism in Longgang volcanic cluster[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1473—1480. (in Chinese with English abstract)
- [11] 陈洪洲, 杨金山, 程宇, 张立忱, 欧阳兆国, 王丽梅, 李天祥. 黑龙江省新生代火山活动分期[J]. 东北地震研究, 2007, 23(1): 55—61.
Chen Hongzhou, Yang Jinshan, Cheng Yu, Zhang Lichen, Ouyang zhaoguo, Wang Limei, Li Tianxiang. Stages about the activity of Cenozonic volcanoes in Heilongjiang Province [J]. Seismological Research of Northeast China, 2007, 23(1): 55—61. (in Chinese with English abstract)
- [12] 胡久常, 郭明瑞, 刘伟, 郑在状. 海口地区火山活动初步研究[J]. 地震地质, 2009, 31(4): 647—654.
Hu Jiuchang, Guo Mingrui, Liu Wei, Zheng Zaizhuang. Primary Research on The Volcanic Activity in Haiko Area[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(4): 647—654. (in Chinese with English abstract)
- [13] 刘强, 盘晓东, 魏海泉, 尹成孝, 孙春强, 金伯禄. 长白山天池火山喷发序列研究[J]. 中国地震, 2008, 24(3): 235—246.
Liu Qiang, Pan Xiaodong, Wei Haiquan, Yin Chengxiao, Sun Chunqiang, Jin Bolu. A borehole study on the eruptive sequence from the Tianchi Volcano, Changbai Mountain[J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(3): 235—246. (in Chinese with English abstract)
- [14] 彭玉鲸, 李景春, 张广宇, 张允平. 中国东北晚全新世火山爆发最新的一次活跃期[J]. 地质与资源, 2008, 17(4): 241—249.
Peng Yujin, Li Jingchun, Zhang Guangyu, Zhang Yunping. The latest volcanic active stage in Late Holocene Epoch in Northeast China[J]. Geology and Resources, 2008, 17(4): 241—249. (in Chinese with English abstract)
- [15] 栾鹏, 许建东, 潘波, 于红梅, 赵波. 长白山天池火山喷发物地形地貌特征初步研究[J]. 地震研究, 2009, 32(2): 182—187.
Luan Peng, Xu Jiandong, Pan Bo, Yu Hongmei, Zhao Bo. Preliminary study on geomorphic characteristics of eruptive products of Tianchi Volcano, Changbai Mountains[J]. J. Seismol. Res., 2009, 32(2): 182—187. (in Chinese with English abstract)
- [16] 张秉良, 赵波, 于红梅, 许建东, 史兰斌, 郑勇刚, 盘晓东. 天池天文峰剖面全新世火山喷发物长石的结构特征及意义[J]. 地震地质, 2009, 31(4): 628—638.
Zhang Binliang, Zhao Bo, Yu Hongmei, Xu Jiandong, Shi Lanbin, Zheng Yonggang, Pan Xiaodong. Structural characteristics of feldspar from Holocene volcanic eruptive rock on the Tianfeng profile in Tianchi and their geological implications[J]. Seismology and Geology, 2009, 31(4): 628—638. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杨清福, 薄景山. 长白山天池火山的研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6): 133—139.
Yang Qingfu, Bo Jingshan. Status quo and prospects for research on Tainchi Volcano in Changbai mountain[J]. Journal of Natural Disasters, 2007, 16(6): 133—139. (in Chinese with English abstract)
- [18] 樊祺诚, 隋建立, 王团华, 立霓, 孙谦. 长白山火山活动历史、岩浆演化与喷发机制探讨[J]. 高校地质学报, 2007, 13(2): 175—190.
Fan Qicheng, Sui Jianli, Wang Tuanhua, Li Ni, Sun Qian. History of volcanic activit, magma evolution and eruptive mechanism of the Changbai volcanic province[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(2): 175—190. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李霓, Nicole Métrich, 樊祺诚. 长白山天池火山全新世 3 期浮岩长石斑晶中熔体包裹体高温热台实验研究[J]. 地震地

- 质, 2007, 29(3): 459—469.
- Li Ni, Nicole Métrich, Fan Qicheng. Heating stage experiments of melt inclusions in feldspars of pumice from three eruptions of Changbaishan Tianchi volcano in Holocene[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(3): 459—469. (in Chinese with English abstract)
- [20] 武成智, 王禹萌, 王丽娟, 刘国明. 长白山天池火山的形成与喷发灾害[J]. *科技资讯*, 2009, 30: 117.
Wu Chengzhi, Wang Yumeng, Wang Lijuan, Liu Guoming. The formation and disaster of Tianchi volcano in Changbaishan mountain[J]. *Science & Technology Information*, 2009, 30: 117. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨清福, 史兰斌, 陈孝德, 陈波, 张羽. 长白山天池火山一次近代喷发物的特征[J]. *地震地质*, 2006, 28(1): 71—83.
Yang Qingfu, Shi Lanbin, Chen Xiaode, Chen Bo, Zhang Yu. Characteristics of recent ejecta of the Changbaishan Tianchi volcano, China[J]. *Seismology and Geology*, 2006, 28(1): 71—83. (in Chinese with English abstract)
- [22] 魏海泉. 长白山火山岩浆柱岩浆上升作用过程[J]. *地学前缘* 2010, 17(1): 11—23.
Wei Haiquan. Magma up moving process within the magma prism beneath the Changbaishan volcanoes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(1): 11—23. (in Chinese with English abstract)
- [23] 赵勇伟, 樊祺诚. 大兴安岭焰山、高山火山——一种新的火山喷发型式[J]. *地震地质*, 2010, 32(1): 28—37.
Zhao Yongwei, Fan Qicheng. Yanshan and Gaoshan volcanoes in the Daxingan mountain range—A new eruption style[J]. *Seismology and Geology*, 2010, 32(1): 28—37. (in Chinese with English abstract)
- [24] 魏海泉, 白志达, 李战勇, 孙谦, 樊祺诚, 史兰斌, 张秉良, 徐德斌, 胡久长, 肖进平, 卢永健. 琼北全新世火山区熔岩流流动速度的恢复与火山灾害性讨论[J]. *地质评论*, 2005, 51(1): 27—35.
Wei Haiquan, Bai Zhida, Li Zhanyong, Sun Qian, Fan Qicheng, Shi Lanbin, Zhang Bingliang, Xu Debin, Hu Juchang, Xiao Jinping, Lu Yongjian. Flow velocity and hazard assessment of the Holocene lava flows in the northern Hainan island[J]. *Geol. Rev.*, 2005, 51(1): 27—35. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杨清福, 史兰斌, 张羽, 陈波, 陈孝德. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积的粒度特征与地质意义[J]. *地震地质*, 2007, 29(3): 480—491.
Yang Qingfu, Shi Lanbin, Zhang Yu, Chen Bo, Chen Xiaode. Grain-size characteristics of the millennium pyroclastic flow deposits of Tianchi volcano and their geological implications[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(3): 480—491. (in Chinese with English abstract)
- [26] 刘强, 魏海泉, 许建东, 栾鹏, 孙春强, 潘波, 赵波, 于红梅. 吉林龙岗四海火山碎屑物粒度分析与地质意义[J]. *地震地质*, 2009, 31(1): 112—121.
Liu Qiang, Wei Haiquan, Xu Jiandong, Luan Ping, Sun Chunqiang, Pan Bo, Zhao Bo, Yu Hongmei. Grain-size characteristics of the Sihai Tephra sheet and their geological implications[J]. *Seismology and Geology*, 2009, 31(1): 112—121. (in Chinese with English abstract)
- [27] 聂保锋, 刘永顺, 彭年. 长白山天池火山泥石流分布特征及其形成模式研究[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(1): 70—75.
Nie Baofeng, Liu Yongshun, Peng Nian. The characteristics of Lahar deposits at Tianchi volcano[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2009, 30(1): 70—75. (in Chinese with English abstract)
- [28] 于福生, 丛立民. 内蒙古阿尔山地区新生代玄武岩及其幔源包体微量元素组成特征[J]. *矿物岩石*, 2006, 26(1): 29—34.
Yu Fusheng, Cong Liming. Trace element characteristics of Cenozoic basalts and their mantle xenoliths selected from Aershan Area in Inner Mongolia, China[J]. *Mineral Petrol.*, 2006, 26(1): 29—34. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李海兵, 杨经绥, 许志琴, 孙知明, Paul T, Jerome V D W, Anne-Sophie M. 阿尔金断裂带对青藏高原北部生长、隆升的制约[J]. *地学前缘*, 2006, 13(4): 59—79.
Li Haibing, Yang Jingsui, Xu Zhiqin, Sun Zhiming, Paul T, Jerome V D W, Anne-Sophie M. The constraint of the Altyn Tagh fault system to the growth and rise of the northern Tibetan plateau[J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, 13(4): 59—79. (in Chinese with English abstract)
- [30] 许建东. 我国火山灾害的主要类型及火山灾害区划图编制现状探讨[J]. *震灾防御技术*, 2006, 1(3): 266—272.
Xu Jiandong. The major types of potential volcanic hazard of China and hazard mapping technique[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 2006, 1(3): 266—272. (in Chinese with English abstract)