

文章编号: 1000- 6524 (2004) 04- 0305- 08

长白山天池火山地质学研究的若干进展与灾害分析

魏海泉¹, 金伯禄², 刘永顺³

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 吉林省第六地质调查所, 吉林 延吉 133001;
3. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100037)

摘要: 通过以减轻火山灾害为目的的天池火山锥体顶部地区地质填图工作, 发现了天池火山锥体附近不同期次火山泥石流, 部分火山泥石流显示的高温定位特征指示了其于千年大喷发的成因联系。这些火山泥石流构成了严重的火山泥石流灾害, 天池火山锥体近顶部大型滑坡体的发现则指示了天池火山另一种重要的灾害类型。滑坡体堆积物结构上可分为 3 种类型。天池火山千年大喷发时不同成分与物性的岩浆混合作用十分发育, 指示了天池火山喷发前不同岩浆批的混合与共喷发机理。本文还论述了天池火山近代历史记录喷发物的分布与鉴别特征。

关键词: 天池火山; 火山地质; 喷发机制; 灾害分析; 研究进展

中图分类号: P317. 3; P317. 9

文献标识码: A

Some advances in the study of volcanic geology and a hazards analysis of Tianchi volcano

WEI Haiquan¹, JIN Bo-lu² and LIU Yong-shun³

(1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China; 2. The Sixth Geological Survey of Jilin Province, Yanji 133001, China; 3. College of Resources, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100037, China)

Abstract: A number of different lahars were recognized during the systematic survey of a mapping project. The high setting temperature feature of the deposits indicates a relationship between the lahar and the Millennium eruption event of Tianchi volcano. The lahars caused serious disasters. Recognition of the huge avalanche scars and deposits around Tianchi volcano implies another highly destructive hazard. Three different structural types of the avalanche deposits have been recognized. There frequently existed magmatic mixing processes during the Millennium eruption of Tianchi volcano, indicating a mixing and co-eruption regime of the eruption. This paper has also discussed some features of the historically accounted eruptions.

Key words: Tianchi volcano; volcanic geology; eruption regime; hazards analysis; advances

长白山新生代火山岩分布区位于吉林省东南部与朝鲜两江道接壤处, 区域构造单元位于东北向图们江裂谷与北西向白山-金策(朝鲜)深断裂带交汇处。火山区内规模较大的火山有长白山天池、甑峰山、望天鹅、土顶子火山, 在朝鲜境内还有胞胎山、绿峰、黄峰等火山。甑峰山火山口形成于中新世早期,

喷出碱性玄武岩——响岩; 土顶子火山口形成于上新世(金伯禄等, 1994); 望天鹅火山口形成于中新世至上新世, 先后有两个火山岩浆演化旋回: 早期为长白期玄武岩、粗面岩, 晚期为望天鹅期玄武岩、红头山期粗安岩、粗面岩、碱流岩(金伯禄等, 1994); 胞胎山、绿峰、黄峰等火山口均形成于上新世晚期至更新

收稿日期: 2004-02-03; 修订日期: 2004-04-20

基金项目: 自然科学基金资助项目(40172033); 科技部社会公益研究专项预警项目资助专题(2002D1A20009_20)

作者简介: 魏海泉(1958-), 男, 硕士, 副研究员, 专业方向火山学、岩石学, 现主要从事火山学与火山灾害方向研究, 电话 010-62009074, 电子邮件: weihq2002@sohu.com。

世,喷出玄武岩-粗面岩-碱性流纹岩。据朝鲜科学院白头山考查队资料(Ri Don, 1993),胞胎山-绿峰、黄峰等火山锥的北雪峰层粗面英安岩-碱性流纹岩古地磁年代为0.70 Ma,热发光年龄0.80 Ma,此层位中还发现酸性潜火山岩株及浅成低温热液型(明矾石热液蚀变)Au、Cu矿脉。天池火山持续时间很长,其中玄武岩盾形成于上新世,粗面岩锥形成于更新世,而全新世期间则爆破性喷出碱流质、粗面质火山碎屑堆积物(刘祥等, 1997; 魏海泉等, 1998, 1999; 刘嘉麒, 1999; Wang *et al.*, 2003)。

为了系统研究天池火山岩浆演化与火山作用的时空分布规律,指导天池火山灾害的减轻,笔者近年来开展了天池火山结构填图与灾害分析研究工作^①。现就天池火山地质研究的若干进展做如下总结。

1 天池火山周围不同期次、不同特征的火山泥石流

野外调查发现,天池火山锥体附近不同期次火山泥石流非常发育(图1),例如在天池火山西坡登山公路,千年大喷发后形成的火山泥石流覆盖于早期滑坡体堆积物之上。堆积物总体成分较复杂,分选较差:上部火山泥石流粒度粗,含浮岩,富集透镜体;中部堆积物无分选,基质支撑,大粒度浮岩、粗面岩、碱流岩为主要碎屑;下部火山泥石流粒度较细,含浮岩透镜层状体,有熔结现象,含碳化木;底部含1~5 cm砂质泥石流。被火山泥石流覆盖的滑坡体堆积物顶部细粒部分被强烈烘烤呈褐红色。另外在锥体西坡还多次见到基质支撑的火山泥石流覆盖于粗面岩渣状熔岩之上,火山泥石流中也常见到碳化木碎屑。根据火山泥石流对其下部的粗面岩滑坡体堆积物顶部的热烘烤并含大量碳化木特征分析,火山泥石流定位时应具有很高的温度,根据堆积物的熔结、烘烤结构与碳化过程估计堆积温度应在300℃以上(Banks and Hoblitt, 1981; Parshley *et al.*, 1982; Baxter, 1990)。笔者选送的3个碳化木样品经中国地震局地质研究所尹金辉等采用¹⁴C法测试,测年结果为1 280±80、1 040±100、1 170±100 a BP,表明这些热的火山泥石流是伴随天池火山千年大喷发而形成的。

前人曾论述过松花江流域火山泥石流发育情况(刘祥等, 1997; 魏海泉等, 1998),笔者近来对鸭绿江和图们江流域的火山泥石流发育情况开展了调查,发现在这两个水系中,天池火山千年大喷发以后的火山泥石流也十分发育,其共同特征是浮岩质细粒火山泥石流经常与一套砂质泥石流共生,呈块状、巨厚层状侵位于一级阶地或二级阶地之上。泥石流常常高出现代河床20~30 m,有时侵位于三级阶地之上,有时还可见到掩埋的动物骨骼(图2a)。这种突发性火山泥石流灾害与满文史料中记述的珲春一带“一夜之间变成一片汪洋”是吻合的(魏海泉等, 2001; Wei *et al.*, 2001)。野外工作中,笔者还对破火山口内、外壁斜坡广为发育的不同时代富岩屑泥石流堆积物开展了调查,其中时代最新的岩屑质泥石流(debris flow,也可称为碎石流)形成于火山喷发间歇期内锥体表面碎石被山洪爆发湍流的搬运与堆积(见图1)。

2 天池火山滑坡体与堆积物及不同结构的锥体滑坡堆积物

2.1 马蹄形洼地与滑坡堆积物

天池火山破火山口内壁大型滑坡体有3处,即白云峰滑坡体、五号界滑坡体和将军峰滑坡体。火山口外壁大型滑坡体主要有四号界西南滑坡体及一些规模较小的滑坡体,如六号界滑坡体。这些滑坡体留下的大型马蹄形洼地符合巨型复合火山大规模滑坡体的共同特征(Tadahide and Glicken, 1986; Tadahide *et al.*, 1986; Wei *et al.*, 2004),马蹄前缘保存有巨大的跨塌陡崖。滑坡体马蹄形洼地与陡崖有关参数如表1所示。

天池火山滑坡体堆积物运动距离差异极大,既有跨塌后基本保持原地堆积的坡移堆积,或称塌方,也有搬运堆积于低洼地带的异地滑坡体堆积,如聚龙泉长廊二道白河西岸褐色、杂色粗面岩滑坡体就是自长白山大峡谷西侧陡壁几百米高处跨落堆积而成。虽然岩层有的已明显破碎,但是总体上可以恢复原始细晶粗面岩与蚀变凝灰岩层位。与此类似的原地堆积滑坡体还见于长白公路明矾石矿滑坡体,依稀可以恢复不同蚀变与矿化的原始层位。

① 魏海泉等, 2003. 长白山天池火山灾害研究. 科技部攻关项目专题报告.

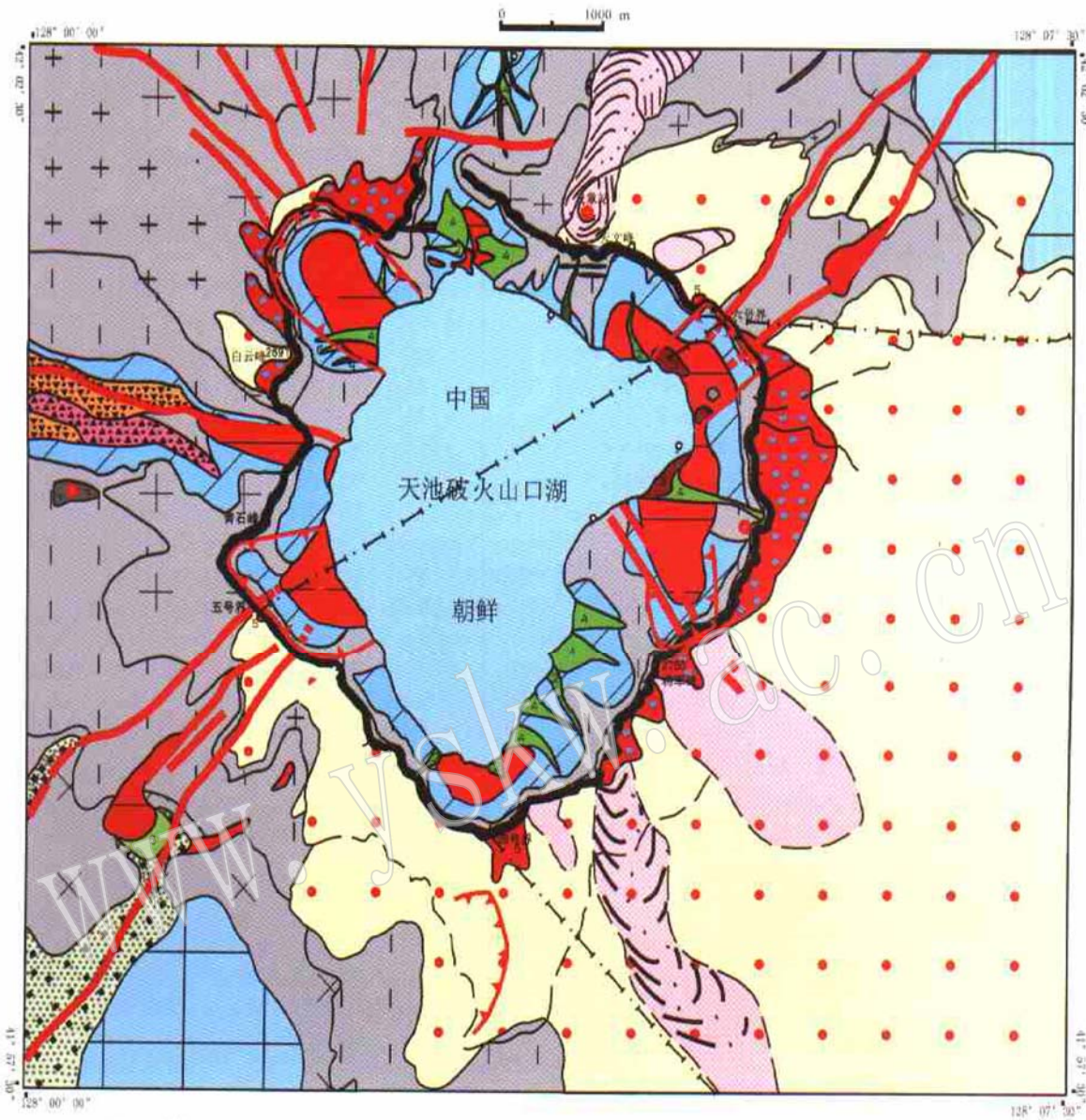


图 1 天池火山锥体顶部火山结构与灾害分布图

Fig.1 Edifice texture and hazard distribution on the top area of Tianchi volcano

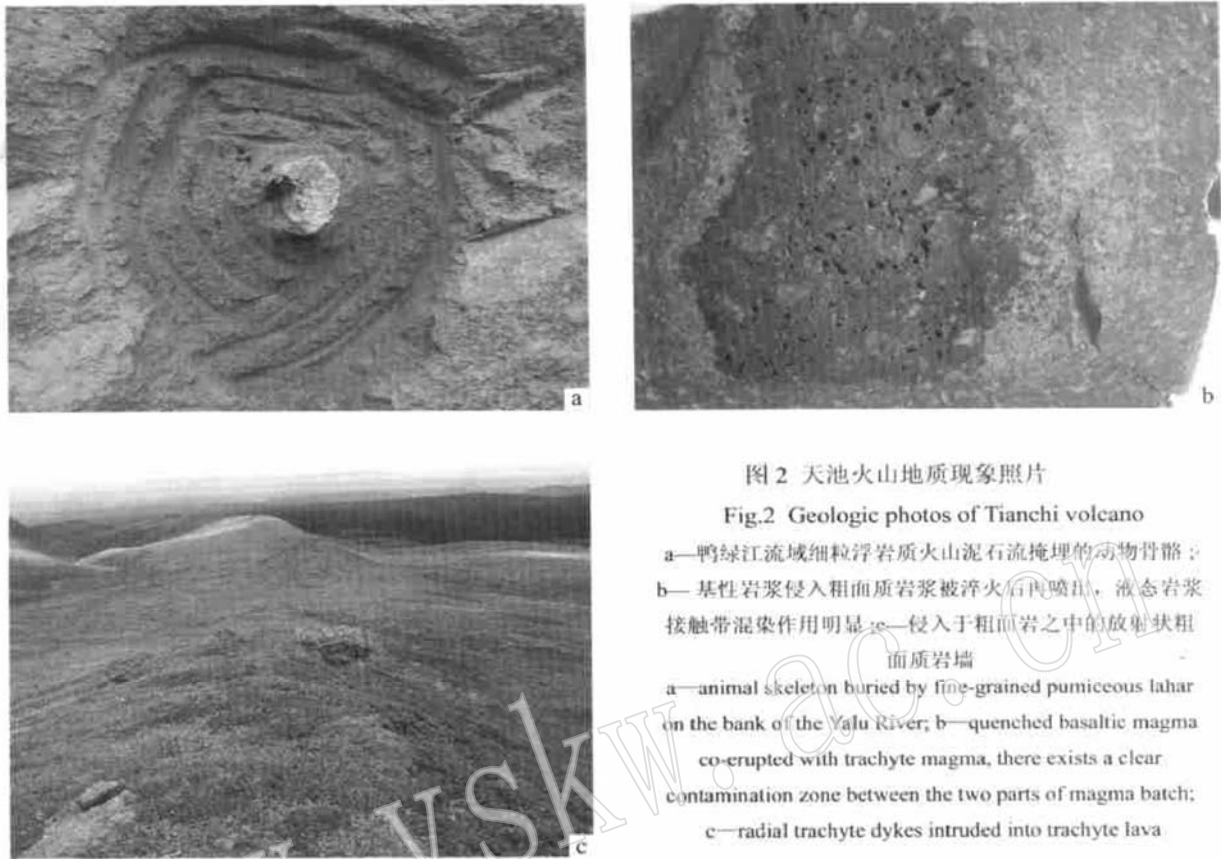


图 2 天池火山地质现象照片

Fig.2 Geologic photos of Tianchi volcano

a—鸭绿江流域细粒浮岩质火山泥石流掩埋的动物骨骼；
b—基性岩浆侵入粗面质岩浆被淬火后再喷出，液态岩浆接触带混染作用明显；c—侵入于粗面岩之中的放射状粗面质岩墙

a—animal skeleton buried by fine-grained pumiceous lahar on the bank of the Yalu River; b—quenched basaltic magma co-erupted with trachyte magma, there exists a clear contamination zone between the two parts of magma batch; c—radial trachyte dykes intruded into trachyte lava

表 1 天池火山代表性大型滑坡体几何参数测量

Table 1 Representative geometric parameters of the huge avalanche scars around Tianchi volcano

滑坡体名称	白云峰	五号界	将军峰	将军峰残余山脊
到水面距离/m	1 250	800	1 300	1 300
水面之上坡度	0.28	0.18	0.07	0.09
入水宽度/m	225	150	360	360
陡壁高度/m	60	100	200	尚未滑坡
陡壁宽度/m	100	200	130	尚未滑坡
陡壁长度/m	500	750	500	尚未滑坡
滑坡体体积/km ³	0.2	0.06	0.15	0.14
水面之上高度/m	440	310	560	560

滑坡体堆积物中最常见的是搬运至锥体靠下位置平缓低洼地带的碎裂化粗面岩以及与此相关的粗面岩岩块堆积物。堆积物表面常呈疏缓波状的丘状地貌，向锥体下部常常引生出众多富含岩屑的泥石流。在滑坡体堆积物的近源相部位，还可以见到由巨大岩块堆积而成的滑坡体岩。岩高度常达 10 m 左右，底部周长七八十米最为常见，而岩块粒度多为 0.5~1 m。

2.2 三种不同结构的锥体滑坡堆积物

天池火山滑坡体堆积物结构通常可分两大类：一为碎裂化粗面岩，保持大岩块的完整性；二为泥质与细粒碎屑支撑的岩屑成分单一或复杂的滑坡堆积物。在西坡登山公路可见到巨厚层滑坡体堆积物顶部覆盖一层 10~30 cm 细粒滑坡堆积物，其中有 3~5 cm 褐红色烘烤层。滑坡堆积物按结构可分为 3 种类型：碎裂化粗面岩、同质碎石（粗面岩质）堆积和异质细粒碎石（细晶、多斑斑状结构的粗面岩）堆积。

在地质图（吉林省地矿局 1:200 000 区调报告）上，天池火山锥体西侧有东西向条带状展布的粗面岩，经详细考察证实其为一滑坡体堆积物，岩性为碎裂化强熔结粗面质熔结凝灰岩。岩层产状集中于 $110^{\circ} \angle 65^{\circ}$ 、 $100^{\circ} \angle 60^{\circ}$ 、 $150^{\circ} \angle 45^{\circ}$ 。节理切割明显，岩块大于 1 m 者常见，宽度多为 10~20 cm。岩块出露长度 100 m，周围岩石破碎，变为细粒碎屑滑坡体。在天池火山锥体东北侧，前人划分的粗面岩锥体部分也有很大一部分为滑坡体堆积物（图 1 东北侧粗面岩锥之下的粗面岩滑坡体堆积物）。滑坡体堆积

物的识别对重建天池火山结构与形成历史具有重要意义。

3 伊格尼姆岩岩浆混合喷发堆积物剖面与岩石样品

野外工作期间,在奶头山浮岩采场找到了出露良好、富含碳化木的伊格尼姆岩岩席露头,堆积物总体较松散,局部发育灰云浪(ash_cloud surge)。在碱流质浮岩碎屑中,常见到不同颜色浮岩条带,表明喷发前与喷发中碱流质岩浆房内及火山通道里发生过岩浆混合作用。对千年大喷发碱流质浮岩的岩浆成分变化,除了找到大量碱流质岩浆混合后再喷发的证据外,还找到了碱流质岩浆与粗面质岩浆交替喷发的堆积物。代表性喷发物是天池火山南侧火山口缘四号界一带浅色布里尼空降堆积物中夹有暗色粗面质熔结角砾凝灰岩。在火山口缘内壁,几十米厚的灰白色空降堆积物之上覆盖有一米多厚的暗色熔结角砾凝灰岩,成因类型也为空降堆积,但由于喷发高度较低而保持较高温度并熔结在一起。在这层暗色熔结层之上,还见到含浅色碱流质浮岩碎屑的滞后角砾岩堆积物,其上又被一层厚约10 cm的浅色细粒碱流质浮岩碎屑覆盖(图3),显示出一个完整的碱流质浮岩爆发相-粗面质碎屑爆发相-富岩屑碱流质碎屑爆发相-碱流质碎屑爆发相的喷发序列,对应

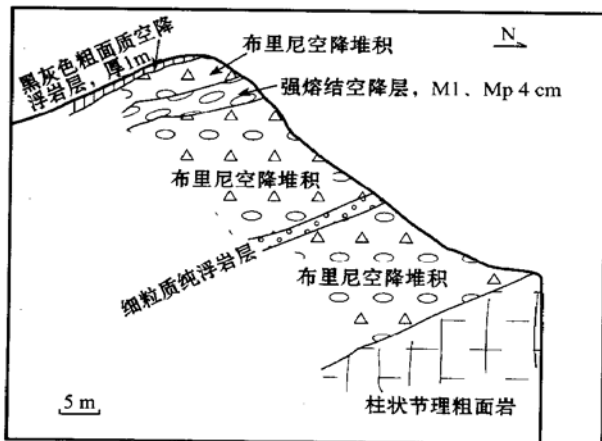


图3 天池火山四号界火山口缘布里尼空降堆积、滞后角砾岩与细粒浮岩空降堆积剖面

Fig. 3 Profile showing Plinian fallout, lag breccia and fine grained pumice fallout on No. 4 Boundary caldera rim

的喷发过程为高的布里尼喷发柱-较低的喷发柱-喷发柱塌陷-高度较低但碎屑化程度很高的喷发柱。其中最上部的浅色细粒碱流质浮岩碎屑可能为1702年喷发物^①。

野外考察时,多次发现粗面岩中包裹有粗面岩、玄武岩包体。岩石包体物相结构特征表明其被捕获时呈流体状态,代表了两种不同的岩浆混合。玄武质岩浆被淬火、析出气泡等现象也很典型(图2b)。

世界上像天池火山这样的火山大规模喷发时,岩浆混合作用是十分发育的(Swanson *et al.*, 1987)。天池火山岩浆混合作用最直接的地质证据是存在着大量的岩浆混合样品,包括不同成分与不同物性的岩浆混合,如野外十分常见的碱流质浮岩碎屑中有不同颜色的碱流质岩浆条带混合穿插、粗面质岩浆碎屑与碱流质岩浆碎屑共存于同一堆积物中、粗面质岩浆包裹于粗面质岩浆中及玄武质岩浆包裹于粗面质岩浆中的现象等等。

不同颜色碱流质岩浆条带常表现为暗色碱流质岩浆条带分散于浅色碱流质岩浆团块中,暗色岩浆条带边部又常常保持撕裂状火焰石构造。粗面质岩浆混合样品见于造锥喷发粗面岩的现代河床冲积砾石中,不同斑晶含量与不同基质结晶程度的粗面岩反应了液态混合包裹再喷出的岩相特征。玄武质岩浆包裹于粗面质岩浆中的现象更为常见,在锥体沟谷河床砾石中可见大量的深色玄武质岩浆团块包裹于灰色粗面岩中。这些玄武岩团块的边界多圆滑但不太清晰,其边部所含气泡往往小于团块内部气泡,反应出一种玄武质岩浆被粗面质岩浆淬火的特征(图2b),这与喷发前不同岩浆批(magma batch)的混合与共喷发机理——深部高温玄武质岩浆上升进入上部粗面质、碱流质岩浆房并触导喷发的机理是一致的。

4 天池火山放射状、环状岩墙与断裂系统的建立

在以往工作中发现了天池火山靠内侧环状岩墙系统,对应的岩性有粗面岩、碱流岩和碱流质熔结凝灰岩。本次工作中首次发现了天池火山锥体靠外侧粗面质放射状岩墙系统。岩墙由长约1km、宽几米

① 魏海泉等. 2003. 长白山天池火山灾害研究. 科技部攻关项目专题报告.

到十几米的富含霓辉石粗面岩组成,具全晶质粒状结构,在岩墙边部矿物定向排列而显示流动构造。地貌特征为略显舒缓波状的刀背状山脊,因较周围粗面岩抗风化能力强而呈正地形。放射状岩墙系统的发现首先得益于室内遥感解译,经野外验证后,确定其为侵入于粗面岩之中的粗面质放射状岩墙(图2c)。根据众多现代火山监测研究工作的经验,火山喷发前岩墙侵入事件是非常常见的现象(Rubin, 1995; Gudmundsson, 1998; Gudmundsson *et al.*, 1999)。天池火山环状、放射状岩墙系统的建立,为研究天池火山的火山灾害以及未来火山不稳定时地震与形变监测资料的地质解释提供了基础依据。

在六号界火山口缘附近,粗面质熔岩与熔结凝灰岩受到北东走向断裂的切割而强烈破碎,由断层角砾岩构成的火山口缘呈尖锐、陡峭状产出,总体上

表现为火山口缘部位明显的低洼豁口,由此造成滑坡体与滑坡堆积物广泛发育于火山锥体外侧斜坡及内侧破火山口内(图1)。

5 天池火山历史记录中喷发物与喷发间隙地表堆积物堆积序列的建立

有关天池火山喷发历史的文字记录相对比较确切的有公元1668年、1702年和1903年(崔钟燮等, 1995)。随着历史文献研究的深入,特别是满族文献史料的发展,应该能够发掘出更多的火山喷发事件的文字记录。在天池火山口缘周边、破火山口内及锥体外侧沟谷当中,也确实发现了众多时代新于千年大喷发的中小规模喷发物(表2)。

公元1668年影响到朝鲜富宁、镜城一带的一次

表2 天池火山全新世火山活动期次划分表

Table 2 The Holocene volcanic activities and surface processes of Tianchi volcano

阶段	期次(时间)	代表性地质体	火山喷发强度			火山休眠期		
			弱	中	强	泥石流	滑坡	垮塌
5	5	二道白河两岸,天文峰下 Q_4^{5-5}				★		
	4	白岩峰下 Q_4^{5-4}				★		
	3(公元1903年)	天池水面东、南侧 λQ_4^{3-3} 射气岩浆喷发物	★					
	2	牛郎渡两侧 Q_4^{3-2}				★		
	1(公元1702年)	五号界 λQ_4^{3-1} 空降物			★			
4	5(公元1668年)	八卦庙 τQ_4^{4-5} 沟谷伊格尼姆岩			★			
	4(公元1668年)	八卦庙 τQ_4^{4-4} 空降暗色层			★			
	3	乘槎河西、白云峰北 Q_4^{4-3}				★		
	2	破火山口陡壁 Q_4^{4-2} 垮塌物					★	★
3	1(公元1413~1668年?)	白岩峰东北灰白色熔结空降层 λQ_4^{3-1}			★			
	4	外坡沟谷及面状火山泥石流 λQ_4^{3-4}				★		
	3(约1000年前, 926 a BP)	土黄色、灰黑色富碳化木伊格尼姆岩 λQ_4^{3-3}			★			
	2(约1000年前)	灰白色空降浮岩层 λQ_4^{3-2}			★			
	1	锥体底部裙状滑坡体 Q_4^{3-1}					★	
2	4	气象站远缘相块状熔岩 λQ_4^{2-4}		★				
	3	气象站中源相碱流岩 λQ_4^{2-3}		★				
	2	气象站近源相流变伊格尼姆岩 λQ_4^{2-2}		★				
	1	气象站东沟陡壁剖面层位 λQ_4^{2-1}		★				
1	2(3950±120 a BP)	黑风口滞后角砾岩 λQ_4^{1-2}			★			
	1	冰场紫灰色伊格尼姆岩 τQ_4^{1-1}			★	★		

注: 公元1903、1702、1668年喷发年代资料见崔钟燮等(1995); 926 a BP 喷发年龄为天池火山同株碳化木样品系列年龄测定资料的最新处理结果; 3950±120 a BP 喷发年龄为截至目前黑风口滞后角砾岩中碳化木年龄的最小值; 期次(时间)的1~5数字为喷发物层位关系。

较大规模喷发以天池附近破火山口内暗灰色粗面质伊格尼姆岩堆积物为代表。这套暗灰色粗面质熔结角砾凝灰岩广泛发育于破火山口内地势低洼部位,在天池北侧乘槎河源头一带曾被命名为八卦庙组。与此对应的其他喷发物包括天池火山口缘附近堆积

的暗灰色熔结空降堆积层、锥体外坡暗灰色粗面质熔结涌浪堆积层和锥体外坡沟谷中广为发育的暗灰色粗面质伊格尼姆岩。天池火山千年大喷发形成的破火山口内壁垮塌物(倒石锥)常被公元1668年喷发的暗灰色伊格尼姆岩覆盖,这种现象在白云峰大

滑坡、五号界大滑坡和将军峰大滑坡马蹄形洼地均可见到,表明这些破火山口内壁跨塌物的形成时间介于千年大喷发和公元1668年喷发之间。这些公元1668年的喷发物又被带状、扇状泥石流覆盖(图1),表明泥石流的形成时间晚于公元1668年。

公元1702年喷发事件的记录还见于朝鲜境内的富宁和镜城。天池火山附近保留的喷发物很少,火山口缘周边局部地带保存的浅灰白色碱流质细粒空降浮岩层与之相对应。在五号界,除了浅灰白色碱流质细粒空降浮岩层之外,在天池水面西侧八卦庙组暗灰色粗面质伊格尼姆岩之上(五号界大滑坡马蹄形洼地之内)还发育两个小型寄生火山口(水面边缘可能有第三个小型火山口),附近见到细粒灰白色碱流质空降层。这些喷发物与寄生火山口的形成在时间上晚于公元1668年,与此相当的喷发堆积物还包括四号界附近灰白色细粒浮岩泡沫壁和六号界附近的灰白色细粒浮岩泡沫壁堆积物。

公元1903年喷发事件记录见于刘建峰著《长白山山岗志略》(李澍田1987年修订),射气岩浆喷发活动规模很小,喷发物仅见于天池水面东南侧及附近若干地点,灰白色多层射气岩浆浮岩质喷发物覆盖于公元1668年喷发物之上,有时还覆盖于时代非常新的带状泥石流之上。

天池火山近一百年来地表作用堆积物表现为现代河谷及山坡上带状泥石流与河床湍流堆积物,它们代表了天池火山时代最新的火山表面搬运堆积作用产物。天池火山近年来记录到的火山地震事件有时很集中(张恒荣等,2003),与此对应的有地表塌方、滑坡与张裂等过程^①。

6 结论

通过天池火山锥体地质填图工作,可以得到以下几点结论:

(1) 天池火山周围不同期次火山泥石流广为发育,其中包括热的火山泥石流。

(2) 天池火山破火山口内壁至少能识别出3个规模巨大的滑坡体洼地,滑坡体搬运过程中在近源地带留下特征的滑坡体岩构造,至少可以区分出3种不同结构的锥体滑坡堆积物。

(3) 天池火山千年大喷发时,碱流质岩浆与粗

面质岩浆发生过明显的岩浆混合作用,在大喷发后期形成了以粗面质岩浆为主的暗灰色伊格尼姆岩;天池火山周围存在着大量的不同成分岩浆混合样品。

(4) 天池火山放射状、环状岩墙与断裂系统广为发育,它们的存在对今后火山灾害研究有重要意义。

(5) 在天池火山口缘周边、破火山口内及锥体外侧沟谷中,发现了众多时代新于千年大喷发的中小规模喷发物,其喷发时代可以与公元1668、1702及1903年等喷发记录相对应;在火山喷发间歇期内,天池火山锥体表面的各种表生地质作用形成了与喷发物相间发育的泥石流、滑坡体等产物。

致谢 本项目是自然科学基金项目和科技部社会公益研究专项专题工作的一部分,项目主要参加人员有中国地震局火山研究中心的有关领导与同事、首都师范大学与吉林省国土资源局有关同事;野外工作中得到了吉林省地震局有关领导与同事的大力支持,尤其是天池火山观测站张恒荣站长及刘国明、武成智等同志提供了多方支持;吉林省地震局杨清福、吉林省长白县国土资源局等领导与同志参加了部分野外工作,北京大学邵济安教授在成文过程中提出了许多建设性的意见,在此一并致谢!

Reference

- Banks N G and Hobbitt R P. 1981. The 1980 eruptions of Mount St Helens, Washington (Summary of temperature studies of 1980 deposits)[A]. Lipman P W, Mullineux D R. The 1980 Eruptions of Mount St Helens[C]. Washington DC: US Govt Printing Office, 295~ 313.
- Baxter P J. 1990. Medical effects of volcanic eruptions, I. main causes of death and injury[J]. Bull Volcanol, 52: 532~ 544.
- Cui Zhongxie, Wei Haiquan and Liu Ruoxin. 1995. A textual research on the historic records of the eruptions from Tianchi volcano, Changbaishan[A]. Liu Ruoxin. Connection of Volcanism and Human Environment[C]. Beijing: Seismic Press, 36~ 39 (in Chinese).
- Gudmundsson A. 1998. Magma chambers modeled as cavities explain the formation of rift zone volcanoes and their eruption and intrusion statistics[J]. J. Geophys Res, 103: 7401~ 7412.
- Gudmundsson A, Laura B M and Marti J. 1999. Injection and arrest of

① 魏海泉等. 2003. 长白山天池火山灾害研究. 科技部攻关项目专题报告.

- dykes: implications for volcanic hazards[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 88: 1~ 13.
- Jin Bolu and Zhang Xiyou. 1994. Researching Volcanic Geology in Changbai Mt[M]. Changchun: Northeast Korea Nation Education Press, 1~ 223 (in Chinese).
- Liu Jiaqi. 1999. Volcanoes in China[M]. Beijing: Science Publisher, 1~ 219 (in Chinese).
- Liu Xiang and Xiang Tianyuan. 1997. Cenozoic Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Northeast China—Resources and Hazards [M]. Changchun: Jilin University Publishing House, 1~ 161 (in Chinese with English abstract).
- Parshley P F, Kiessling P J, Antonius J A, *et al.* 1982. Pyroclastic flow injury. Mount St Helens, May 18, 1980[J]. *Am. J. Surg.*, 143: 565~ 568.
- Ri Don. 1993. Paektu volcano[A]. *Geology of Korea*[C]. DPR of Korea: Foreign Languages Books Publishing House, 330~ 349.
- Rubin A M. 1995. Propagation of magma filled cracks[J]. *Annu Rev Earth Planet Sci.*, 8(23): 287~ 336.
- Swanson D A, Dzurisin D, Holcomb R T, *et al.* 1987. Growth of the lava dome at Mount St. Helens, Washington (USA). 1981~ 1983 [A]. Fink H J. Emplacement of Silicic Domes and Lava Flows: The Geological Society of America, Special Paper 212[C].
- Tadahide U and Glicken H. 1986. Internal structural variations in a debris avalanche deposit from ancestral Mount Shasta, California, USA[J]. *Bull. Volcanol.*, 48: 189~ 194.
- Tadahide U, Kawachi S and Neall V E. 1986. Fragmentation of debris avalanche material during flowage—Evidence from Pungarehu Formation, Mount Egmont, New Zealand [J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 27: 255~ 264.
- Wang Y, Li C, Wei H, *et al.* 2003. Late Pliocene— recent tectonic setting for the Tianchi volcanic zone, Changbai Mountains, northeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 21: 1 159~ 1 170.
- Wei H, Hong H, Sparks R S J, *et al.* 2004. Potential hazards from eruptions through Tianchi caldera lake, China[J]. *Geoacta* (in press).
- Wei Haiquan and Liu Ruoxin. 2001. Clues of volcanic eruption in China from myths, legends and written records[J]. *Acta Petrologica et Minerologica*, 20 (3), 335~ 343 (in Chinese with English abstract).
- Wei Haiquan, Liu Ruoxin, Fan Qicheng, *et al.* 1999. The Tianchi volcano in the Changbai Mountains, Northeast China—a polygenetic central volcano[J]. *Geological Review* 45 (sup.): 257~ 262 (in Chinese with English abstract).
- Wei Haiquan, Taniguchi H and Liu Richeng. 2001. Chinese myths and legends for Tianchi volcano eruption[J]. *Northeast Asian Studies*, 6: 191~ 200.
- Wei Haiquan and Yang Qingfu. 1998. The geology of Tianchi volcano, Changbaishan[A]. Liu Ruoxin, Wei Haiquan, Li Jitai. The Latest Eruptions from Tianchi Volcano, Changbaishan[C]. Beijing: Science Publisher, 6~ 18 (in Chinese).
- Zhang Hengrong, Liu Guoming, Wu Chengzhi, *et al.* 2003. Preliminary study on the active state of Changbaishan Tianchi volcano[J]. *Seismology and Geology*, 25, 109~ 120 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔钟燮, 魏海泉, 刘若新. 1995. 长白山天池火山喷发历史记载资料的考证[A]. 刘若新. 火山作用与人类环境[C]. 北京: 地震出版社, 36~ 39.
- 金伯禄, 张希友. 1994. 长白山火山地质研究[M]. 长春: 东北朝鲜民族教育出版社, 1~ 223.
- 刘嘉麒. 1999. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1~ 219.
- 刘建峰(李澎田修订). 1987. 长白山江岗志略[M]. 长春: 吉林省文史出版社.
- 刘祥, 向天元. 1997. 中国东北地区新生代火山和火山碎屑堆积物——资源与灾害[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1~ 161.
- 魏海泉, 刘若新. 2001. 从神话、传说与文字记录中探索中国活火山喷发的信息[J]. *岩石矿物学杂志*, 20(3): 337~ 343.
- 魏海泉, 刘若新, 樊祺诚, 等. 1999. 长白山天池火山——多成因中央式火山[J]. *地质论评*, 45(增刊): 257~ 262.
- 魏海泉, 杨清福. 1998. 长白山天池火山地质[A]. 刘若新, 魏海泉, 李继泰. 长白山天池火山近代喷发[C]. 北京: 科学出版社, 6~ 18.
- 张恒荣, 刘国明, 武成智, 等. 2003. 长白山天池火山监测与火山活动状态的初步分析[J]. *地震地质*, 25(增刊): 109~ 120.