

火山作用与人类环境

主 编 刘若新

副主编 卢振恒 任锦章

地震出版社

编 委 会

主 编 刘若新

副主编 卢振恒 任锦章

委 员 上官志冠 卢振恒 刘小伟

刘若新 刘盛武 刘嘉麒

孙善平 任锦章 汪集旸

李继泰 邱家骧 张虎男

阚荣举

序 言

晚白垩世至第三纪时期,我国大陆及邻近海域曾是火山活动异常强烈的时期。第四纪火山活动则主要分布在东北—华北裂谷系的周边及外围地带、雷琼及南海地区、台湾岛弧北部及东部,中国西部青藏及周边地区的新南—藏北地区和云南腾冲地区,也有较为强烈的第四纪火山活动。而近代火山活动,则主要出现在东北的长白山区、敦化—镜泊湖—牡丹江一带、五大连池,以及云南的腾冲地区。关于东昆仑的可可西里和西昆仑阿什库勒火山群的阿什山火山,曾有近期火山喷发的报告,但经近年来的实地考察尚未被证实,或至多只是一种喷气活动,台湾北部及北部海域诸岛屿,虽被视作琉球弧火山链的西南端,但也迄今未证实有近代火山活动。上述自第三纪以来,我国火山活动呈逐渐减弱的趋势,很容易给人一种印象:中国没有什么活火山,更没有曾经能造成大的火山灾害的近代活动火山。我国的历史记载中缺乏关于火山喷发和火山灾害记载,也加强了上述印象。但是,现在我们可以明确地宣布,上述印象是错误的。我国不仅存在像五大连池火山、腾冲火山、龙岗山火山群中的一些火山、牡丹峰火山等近代或历史上有过喷发活动记载的火山,而且还存在像长白山天池火山这样的曾经发生过被认为是地球上近 2000 年来最大最猛烈的火山喷发之一的近代活动火山。现今该区大量的炭化木遗骸,表明该次大喷发曾毁灭了当时长白山区的原始森林。因此,必须改变过去那种错误印象,加强火山及火山灾害知识宣传,在我国一些地区的公众中树立火山灾害意识。建议有关部门充分意识到我国存在近代活动火山,并存在潜在的、但又是严重的火山灾害威胁这一事实,采取有力措施,开展对长白山天池火山、五大连池火山及腾冲火山等少数几个有潜在喷发可能的火山地区的监测研究,以预防及减轻可能出现的火山灾害。这就是出席第一次全国火山学术讨论会的专家们发出的呼吁。

本文集收入了提交该次会议的论文共 32 篇,论文摘要 3 篇。其中有关长白山天池火山的论文 5 篇,有关五大连池火山和腾冲火山的各一篇。火山灾害与环境是本次会议的主题,有多篇文章论述了全球火山灾害及火山喷发对全球变化、环境的影响。其中李晓东等关于 1991 年皮纳图博火山喷发对全球气候变化影响研究的一组论文是极富说服力的。这次喷发注入平流层的 SO_2 总量被估计为 16—25 百万吨,喷发后的卫星观测、雷达探测、地面观测以及飞机和气球取样,详细记录了该次喷发后由 SO_2 导致形成 H_2SO_4 气溶胶(SVA)的形成、扩散、衰减、光学厚度及其对辐射、臭氧层等以及对全球气候变化的影响。平流层臭氧总量在有些地区下降达 20%,喷发后 10 个月内平均辐射亏损 2.7%,全球陆地平均气温下降 0.75°C ,1992 年是近 10 年北半球最冷的年份。此外,全球大气环流和降水场、风场等都有显著的异常变化。这就是所谓的“火山冬天效应”。人们还记得印尼坦博拉火山 1815 年大喷发后的第二年被称为“没有夏季的年份”,以及全球许多地方的气候异常;也有人将公元 536 年在中国所观测到的天空昏暗以及 537 年的寒冷和随后两年的干旱大饥荒,最后导致某些地方 70%—80% 的人员死亡,归因于长白山天池火山的大喷发。可见,火山喷发对人类环境及全球气候变化的影响,是绝不容被忽视的。

刘嘉麒的论文从火山分布与地貌形态、火山岩组成、火山活动时代与周期性对我国第四纪特别是全新世火山作了较全面的介绍,并根据已掌握的资料和有关判据,指出我国火山潜在的危险。刘若新、魏海泉等的论文在较全面介绍长白山天池火山的基础上,重点描述了该火山公元750—960年间的一次大喷发,并对其喷发物的体积和规模、喷发年代及Cl、F、S、CO₂等有害挥发分释放总量作出估计和判断,用大量资料显示了那次大喷发的情景。刘祥等报道那次大喷发形成的火山泥石流沿二道白河直至距天池火山300km之外吉林市以北的第二松花江两岸的分布。李继泰等则报道了天池火山区近期动态观测的初步结果。冯德益等初步分析了天池火山区地震观测记录所反映的地震类型,崔钟燮等还在会上报告了那次大喷发对天池火山周围地区森林毁灭的情况。所有这些都给人以强烈印象:对于天池火山潜在喷发危险性和可能发生的严重火山灾害万万不可粗心大意!吕宗文介绍了他们填制的五大连池1719—1721年喷发的老黑山、火烧山第一幅火山地质图,并就有关问题作了讨论。阙荣举的报告显示在腾冲火山区地下可能存在岩浆囊。本文集还收入了杨人光、孙善平等关于用爆破方法治理火山的设想和科学论证,颇具新意,如果将其与火山喷发的预测预报紧密结合起来,有可能为减轻火山灾害开辟新的途径。对于以喷发熔岩为主的火山灾害的防治,国外已有比较成功的经验,其办法是通过控制熔岩流动方向(如在埃特纳火山多次喷发时所做的试验),或向熔岩流投掷炸弹以阻止其前进,或向熔岩大量注入固化剂那类物质,促使其固化而不再向前流动(如在冰岛费尔火山1974年喷发时所做的那样)。这些办法都取得了避免一些城镇被熔岩流所摧毁的实际减灾效果。但是对于那些以碎屑喷发为主的爆炸式火山喷发,则主要通过对这些火山的综合监测、预测、预防以达到减轻火山灾害的目的,1980年美国圣海伦斯火山喷发前和皮纳图博火山1991年大喷发前的预报和采取的措施,都曾经极大地减轻了这两次火山灾害的损失。这也证明,对被认为具有潜在喷发危险的火山布设监测台网,将能够有效地监视该火山的活动,并对其可能的喷发作出成功的预报。

本文集还收入了介绍有关火山监测研究方法,以及国外火山及火山监测研究现状的文章,作为我国开展火山监测研究的借鉴。

本文集的论文在一定程度上反映我国火山学研究的现状。由于前述在我国公众甚至在地球科学家中长期存在我国缺乏近代活动火山,没有什么火山灾害问题这样的错误印象,也导致火山学研究在我国长期被忽视,致使我国火山学研究起步很晚,目前的研究水平还不高,还不能与我国存在现代活动火山及火山灾害威胁这一实际情况相适应。我们期望有志于火山研究的同仁加倍努力,在不太长的时间里,把我国火山学研究提高到一个新的水平。我们衷心地期望,通过本文集中介绍的有关情况,能够使有关部门及其领导理解并得出相应的结论。果如是,则我国的火山事业定将得到发展,未来可能出现的火山灾害,定将会大大减轻。

刘 若 新

1994年10月

目 录

长白山天池火山	刘若新 魏海泉 李继泰 杨清福 许东满(1)
天池火山 1000 年前喷发的碎屑堆积物观察	刘 祥 向天元(14)
长白山天池火山近代火山碎屑堆积物成因类型 及灾害预测	魏海泉 刘若新(21)
长白山天池火山地质及近期动态观测结果	李继泰 杨清福 李春峰 马明志(28)
长白山天池火山喷发历史记载资料的考证	崔钟燮 魏海泉 刘若新(36)
长白山天池火山喷发物的堆积类型及火山活动演化	张成梁 张普林 傅太治(40)
老黑山、火烧山(1719—1921 年) 火山地质	吕宗文(44)
黑龙江二克山火山玄武岩渣粒度分析及显微形貌研究	魏海泉 任锦章(55)
黑龙江二克山火山喷发序列特点和喷发期次的考察研究	任锦章 魏海泉(63)
对大兴安岭“甘奎”火山群的新认识	徐亚勤 仲伟成 陈洪洲(71)
黑龙江省新生代火山岩的构造环境与地震活动	陈洪洲 徐亚勤(81)
小古里河-科洛-五大连池火山带	巩杰生(86)
腾冲火山地区的深部构造与地球物理场	阚荣举 赵晋明(88)
云南腾冲火山群的 K-Ar 年代学研究	范嗣昆 朱炳泉 王慧芬 戴 漠 相学昌(89)
根据地震波形和频谱判断火山地震类型的新方法	冯德益 陈化然 马明志 李凡希(91)
火山活动区地下流体及其稳定同位素组成初步研究	上官志冠(98)
火山活动、地震活动、水热活动关系 ——以华南沿海地区为例	张虎男(101)
人工爆破治理火山灾害可行性探讨	杨人光 孙善平 莫宜学(108)
火山活动与人类环境	刘盛武 周崇顺(115)
火山灾害综述	李 甍(119)
世界不同火山区域的强火山爆发与我国夏季旱涝的关系(摘要)	张富国 张先恭(124)
与火山活动有关的地磁变化	詹志佳(125)
不同纬度和季节的火山喷发对全球气候的影响	李晓东 王绍武(132)
火山学模型与火山灾害学研究 ——1993 塔培拉 IAVCEI 大会有关火山学方面的情况	魏海泉(142)
日本火山科学研究进展	卢振恒(148)
新西兰第四纪火山喷发碎屑堆积物及其灾害考察	刘 祥(158)

菲律宾皮纳图博火山喷发对全球气候影响的数值模拟研究

.....	李晓东 王绍武 黄建平 G.R.NORTH(161)
皮纳图博火山喷发及其影响的研究	李晓东 王绍武 刘若新(169)
控制埃特纳火山熔岩流动的导流实验	曹英 刘若新(177)
中国火山活动及其潜在的危险	刘嘉麒(182)
中国晚新生代火山分布和产生的地热背景	汪集旸(191)
燕山地区新生代火山喷发的时空分布特征	易明初 李 晓(197)
汾渭与贝加尔裂谷系火山活动	李锦蓉(198)
我国近期火山特点与监测研究方法	吕宗文(199)
火山监测研究的方法与建议	尹集刚 李一兵(203)

长白山天池火山^①

刘若新 魏海泉 李继泰、杨清福
(国家地震局地质研究所) (中国地质大学) (吉林省地震局)

许东满
(吉林省延边州地震办公室)

长白山天池及其周围地区，是松花江、鸭绿江、图们江三江之源，也是我国清王朝发祥之地，并被尊为“长白山之神”。但认识到长白山天池是一座近代火山，则始于本世纪初刘建封对三江源地的考察。虽然历史记载过天池火山的若干次喷发活动，而真正认识到天池火山在近代曾经发生过大规模猛烈的喷发，现在仍具有潜在灾害性大喷发威胁，也是世界上最危险的火山之一的，则是近几年的事。所有考察过天池火山的中外火山学家，几乎一致地指出，长白山天池火山在大约 1000 年前的一次大喷发，就其规模和猛烈程度，属于全球近 2000 年来最大的喷发之一。这次喷发所导致的全球变化和该火山未来喷发危险性 & 火山灾害威胁，已成为科学家们高度关注的问题。但是在我国公众甚至在地球科学家当中，对于作为国际生物圈自然保护地和自然保护区的长白山天池地区，对于我国主要林业基地之一的长白山，对于驰名中外的旅游胜地的长白山天池，可能是熟知的。而对作为一座具潜在灾害性喷发危险的天池火山则知之甚少，或者一无所闻。这种情况对于天池火山未来可能给予这个地区造成可怕的火山灾害的预防和减轻，是极为不利的。

本文报道自 1990 年以来我国对天池火山多次考察研究的初步结果，意在以实际资料展示天池火山的概貌。如果这些资料能引起有关部门和人士对天池火山的关注，唤起人们对天池火山未来喷发危险的警觉，那将是对我们的最高奖赏。

一、长白山天池火山的命名和沿革

早在战国时期，长白山就被称为“不咸山”，意为“有神之山”。汉、魏、北朝及隋唐时期，分别称为“盖马大山”、“徒太山”、“白山”、“太白山”等，直至距今 970 余年的辽金时期，用汉语明确定名为“长白山”。但这里所说的“长白山”，实际上是指长白山系的主峰地带，而并非专指长白山天池火山。作为满族和清王朝发祥胜地的长白山，则似乎是专指天池火山区。据清史稿《太祖本纪》记载，清太祖努尔哈赤的先祖布库里雍顺的母亲佛库伦，传说是一位仙女，因降浴库勒湖（今天池火山锥东侧的一个小火山口湖，名圆池），吞吃了一个朱果而怀孕生下了他。雍顺按其母指点，顺江而下，后定居于今敦化。因而清王朝视以天池火山为中心的长白山为发祥兴隆之地，清康熙 16 年（公元 1677 年）被尊为“长白山之神”^[1]。

① 地震联合基金及国家自然科学基金资助项目。

真正认识到“长白山之神”是一座火山则是近代的事。以往不论在中国还是在朝鲜均被称为“白头山火山”或“长白山火山”，日本人称该火山为 Hakutou-san，译成汉语也仍是“白头山火山”。“白头山”是天池破火山口环形外缘诸峰中最高的一座（海拔 2749m），位于朝鲜一侧。考虑到天池火山为中朝两国所有，国界通过天池中心，“白头山”如今已被重新命名为“将军峰”。又考虑到“长白山火山”一词很容易被理解为长白山区诸多火山的泛称，因此需要对这座位于中朝边界的火山给出一个能被普遍接受、并富有该火山特色的名称。作者建议今后称该火山为“长白山天池火山”，或简称“天池火山”。这一建议已为参加第一次全国火山学术讨论会的专家们所接受。

二、研究简史

对天池火山的考察始于 1908 年（清光绪 34 年）的刘建封^[2]。作为奉吉勘界副委员，他率随从及向导多人对包括天池火山在内的三江源地的山山水水，作了四个多月的实地考察。第一次对天池火山口环形外缘 16 个山峰命名（例如白云峰等仍沿用至今），绘制了“长白 I 江冈全图”，并著有《长白山江冈志略》，署名为天池钓叟（吉林文史出版社，1987 年重新出版）。书中还转述了其向导曾目睹的一次小规模天池火山喷发活动。1911 年，刘建封还将该次考察所摄的 41 幅照片附上具体说明，以“长白山灵迹全影”奏奉清廷。

1927 年、1935 年，日本人川繁太郎、小仓勉先后到长白山作过调查^[1]，1937 年 Kano 首次报道天池火山被浮岩堆积物所覆盖^[3]。1942—1943 年，日本人曾组织过一次对天池火山的综合考察，Asano 于 1948 年发表了这次考察的部分新发现^[4]，其中也报道了天池火山顶部覆盖着浮岩降落堆积和伊格尼姆岩席^[5,6]。80 年代初，刘嘉麒、郑祥身对天池火山进行了较系统的 K-Ar 年代学和岩石学研究，指出天池火山锥主体由粗面岩、碱流岩组成。早期喷发物主要为石英粗面岩、石英碱性粗面岩、碱流岩，而全新世及近代喷发物主要是碱流岩质浮岩和熔结凝灰岩^[7]。天池瀑布剖面岩石 K-Ar 年龄介于 0.55—0.09Ma 之间^[8]。解广轰等^[9]、汤德平、田丰^[10]研究了天池火山区岩石的地球化学，指出粗面岩经历过分离结晶作用。岩浆中有外来地壳物质加入。金伯禄^[11]、刘祥等^[12]、许东满等^[13]先后对天池火山近代喷发物进行了描述和划分，提出了对这些喷发物的分期分组建议方案。宋海远等^[14]研究了长白山火山群及天池火山地貌和火山灰等。Machida 等^[15,5]将产于日本北海道南部和九州岛北部的一个火山灰层（厚 2—5m），和在日本海一系列钻孔见到的火山灰层（最厚 16cm）被命名为 B-Tm 火山灰层，其时代被限制于公元 915—1334 年间。据物质组成、喷发年代及火山灰层厚度由日本北部向西经日本海至长白山方向逐渐增厚等事实，Machida 等确认 B-Tm 火山灰层来自中朝边境上“白头山火山”（天池火山）的一次强烈爆发的火山灰降落。1990 年 Machida 等对距今约 1008 年前发生于长白山天池的爆炸火山喷发的碎屑物进行了地层学和岩相学研究。指出这次大喷发是由一个复杂的事件系列所组成，最初形成火山泥石流，随后是两次布里尼降落堆积（白头降落堆积和圆池降落堆积），和两次火山碎屑流（长白碎屑流和白山碎屑流），指出长白山天池火山的这次大喷发，是全球近 2000 年来最大的爆炸喷发之一^[16]。著名火山学家 George P.L.Walker 于 1990 年对天池火山作短期考察后指出：“……这次喷发非常之大，

按其喷发规模和猛烈程度,属于全球火山中1%最大规模喷发之一。”他还提醒当地居民、警察、导游和旅游者都应记住这一基本事实:“长白山天池火山是世界上潜在最危险的火山之一”(George P.L.未发表的考察报告,1990年7月)。刘若新等于1990—1991年考察之后,根据对火山危险性评价的一般准则,指出长白山天池火山是一座具有潜在喷发危险的现代活动火山,并建议尽快开展对该火山的监测研究^[17]。J.Gill指出^[18],天池火山于公元600—1000年间曾发生过喷发,该喷发是近2000年全球最大的喷发之一,其喷发岩浆为富Cl的碱流岩质岩浆,他估计这次喷发释放至大气层中的Cl量达 10^6kt 量级,这比全部人类历史产生的CFCs还要多!他还讨论了这次喷发与格陵兰冰芯中记录到的公元626年的一次喷发的可能联系。

由上述研究简史可以看出,自80年代以来,长白山天池火山已引起中外学者的高度关注,并从对火山的岩石学、地球化学研究转向对其进行火山学及喷发危险性的研究。他们几乎一致地指出,天池火山是一座具有潜在灾害性喷发危险的大型近代活动火山。这就结束了不仅在我国公众中,而且在地球科学家中长期存在的“中国不存在火山灾害威胁”的错误印象。这导致参加全国第一次火山学术讨论会的专家们发出呼吁,建议政府及有关部门,应当重视我国若干地区,特别是长白山天池火山存在火山灾害威胁这一严峻事实,并建议开展对那些具潜在喷发可能的近代活动火山的监测研究。这就是我们在回顾天池火山研究历史时得出的主要结论。

三、天池火山地质背景及新生代火山活动简述

天池火山所在的长白山区位于华北克拉通北缘,其基底为太古代至中、晚元古代的变质岩系。与华北克拉通其他地区一样,古生代沉积盖层中缺失志留、泥盆系。中生代时期主要是发育一系列陆相沉积盆地并伴有比较强烈的中-酸性火山-侵入岩浆活动。新生代时期长白山区隆起,形成裂谷断陷和一些拗陷盆地。例如由马鞍山经天池火山至长虹岭一带,有断续出现的断陷盆地,其中充填砾岩-砂岩-砂质粘土互层,并夹有硅藻土层及玄武岩层,时代为晚渐新世至早中新世。实际上长白山天池火山是位于鸭绿江-珲春裂谷带上^[19,20]。在整个晚第三纪及第四纪期间,抚顺-密山断裂带及鸭绿江-珲春裂谷带及其两侧地区,发生了强烈的玄武质火山活动,刘嘉麒^[21]将此区的玄武质火山作用分为甑峰山期(24—19Ma),奶头山期(16.7—12.0Ma),老爷岭期(11—7Ma),军舰山期(4.5—2.1Ma)等。长白山地区是我国第四纪火山作用最强烈地区之一。在鸭绿江、图们江上游河谷地带,第四纪玄武岩的年龄为0.131—0.064Ma。长白山西麓辉南、靖宇一带的龙岗火山群,在近千平方公里范围内,火山口和火山渣锥星罗棋布,据欧喜祥^[22]、刘祥^[23]和刘嘉麒^[21]的资料,其年龄范围为1.49—0.08Ma。刘祥分出该区早更新世的玄武质熔岩流,中更新世的玄武岩质火山碎屑喷发及晚更新世熔岩三期喷发。刘祥等^[23]在辉南四海屯、红旗林场一带玄武质火山渣底层采得烤焦的树木样品,经两个 ^{14}C 实验室分别测定其 ^{14}C 年龄值为 $1690 \pm 85\text{Ma}$,和 $1587 \pm 70\text{Ma.BP.}$,这是长白山区又一个近代火山活动的证据。在抚顺-密山断裂带敦化至镜泊湖、牡丹江一带,也有较大面积的第四纪玄武岩,其K-Ar年龄跨越早更新世至全新世^[21]。据盛中方提供的资料,在牡丹峰火山渣中炭化木的 ^{14}C 年龄值为5140年。文献引用长白山天池火山历史喷发记载中,曾列举公元

1900年有一次喷发，经过查阅《长白山江冈志略》（1987年吉林文史出版社）对照，实际上记载的“火山喷发”现象是抚宁黄献廷夜间由沙河沿回敦化县城途中于猪圈岭所见。而天池火山在敦化以南150km之外，因而不大可能是天池火山爆发，而更可能是敦化附近一次小规模火山喷发活动，其具体地点仍有待进一步考证。但上述资料表明，在抚顺-密山断裂带与鸭绿江-珲春裂谷，除长白山天池火山外，还存在多处近代火山活动。

前述长白山地区新生代火山作用，均属幔源玄武质岩浆火山作用。据刘祥^[12]的资料，在天池火山南面约40km的望天鹅火山，由16.4—5.6Ma的中新世玄武岩和粗安岩组成，其东缘的红头山火山，由上新世的碱流岩组成（K-Ar年龄为3.1Ma）。这是长白山与天池火山类似的由玄武岩-粗安岩、粗面岩-碱流岩组成的火山岩演化系列。

四、天池火山锥及破火山口

长白山主体是自早中新世以来在地壳间歇性抬升和多次火山喷发过程中逐渐形成的。新生代玄武质火山岩覆盖着该区70%以上的面积。上新世时期，面积达1000余平方公里的军舰山期玄武岩（4.5—2.1Ma），形成广阔的熔岩台地。长白山天池火山锥体，就是在这种玄武岩台地上的盾形火山基础上发育起来的，由中晚更新世白头山组粗面岩-碱流岩的多次喷溢形成的层状截顶火山锥体。海拔1700—2749m，锥体底部呈NW-SE延伸的椭圆状，长轴约27km，锥体坡面显阶梯状，每一阶梯代表一次岩浆喷发，最高一级海拔2670m，天池气象站即建于其上。厚约1000m左右的锥体主要由钠铁闪石或霓辉石英粗面岩与碱流岩质集块岩及碱流岩组成；往上是下部为集块岩和碎屑岩、上部为粗面岩的相似四个喷发旋回，但最上部的旋回以碱流岩熔岩为主。刘嘉麒^[8]系统测定了天池瀑布剖面岩石的K-Ar年龄，其上部岩石为0.21Ma，中部为0.44Ma，下部为0.55Ma；而天文峰剖面下部为0.28Ma，上部为0.10—0.09Ma。可见，锥体应是在中、晚更新世形成的。锥体顶部是一个巨大的火山口湖，就是著名的天池火山口湖，湖面海拔约为2189m，南北长4.4km，东西宽3.37km，周长13.1km，平均水深204m，最深达373m，总蓄水量约20.4亿m³，相当于一个大型水库的蓄水量。天池每年10月至次年5—6月为冰冻期，但在天文峰南及湖的西北部有常年不冻区，并有气泡冒出，表明有深部热水补给。湖水经北缺口流出至距天池水面1250m处，飞跌直下，形成高68m的著名长白瀑布。这一1250m的河段被称为乘槎河或通天河。1908年刘建封考察天池火山及松花江源时曾写下“松花江上乘槎客，寻到天池信有源”的诗句。瀑布水下泻即松花江正源二道白河源头，天池水面距白云峰高差可达近500m。外缘山中海拔大于2500m的山峰有16座。其中包括有白云峰（2691m）、天文峰（2670m）、玉柱峰（2664m）、华盖峰（2640m）、以及朝鲜一侧的白头峰（将军峰，2749m）等。火山口缘向天池一侧均为悬崖峭壁，而向外一侧比较平缓，所有外缘山的顶部和锥体坡面和外围一些平缓的阶坡上，披覆着全新世及近代喷发物。

五、天池火山近代喷发物

在图1中,主要表示了天池破火山口周围6—16km范围内出露的军舰山玄武岩和白头山组粗面岩以及覆盖于其上的近代喷发物。以下简要叙述这些近代喷发物。

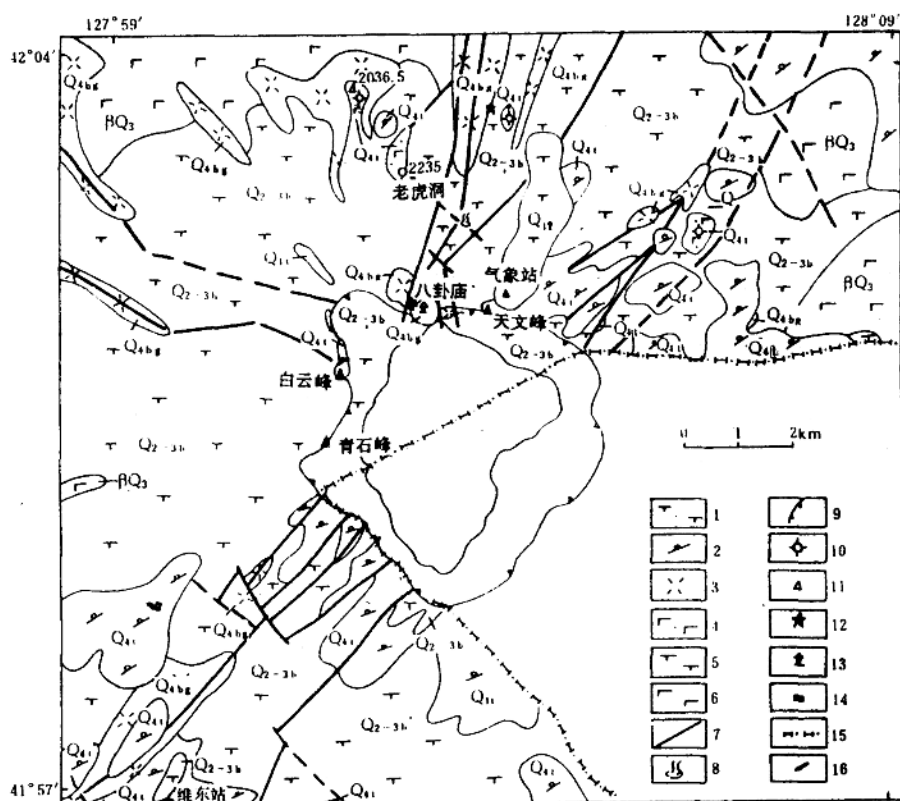


图1 长白山天池火山地质略图

- 1.气象站组 (Q_{4q}) 碱流岩; 2.天文峰组 (Q_{4t}) 浮岩; 3.八卦庙组 (Q_{4b}) 凝灰质砾岩;
4.老虎洞组 (Q_{4l}) 玄武质火山渣; 5.白头山组 Q_{2-3b} 粗面岩; 6.广坪组 (βQ_3) 玄武岩;
7.断裂; 8.温泉; 9.破火山口; 10.火山口; 11.至高点; 12.地震观测站; 13.八卦庙; 14.边防站; 15.国界; 16.岩脉

1. 老虎洞玄武岩

在火山锥北侧老虎洞一带,覆盖于白头山组粗面岩之上的红色-紫红色熔渣状碱性玄武岩,许东满等^[13]将其命名为老虎洞玄武岩,其厚度为93.8m,其上覆盖粗面质火山碎屑岩。金伯禄^[11]报道在歪歪顶子一带有这种玄武岩的火山锥,此外在天池火山锥北坡距天文峰约4km处的登山公路上,以及西南坡锥西站附近也有这种玄武岩出露。这种玄武岩的主要成分与该区晚第三纪、第四纪玄武岩相似,其REE总量较粗面岩和碱流岩为低,但其REE配分形式和斜率却极为相似,很可能,这种碱性玄武岩是代表天池深部岩浆房中地幔源岩浆成分。

2. 浮岩降落堆积

根据在天池火山口缘及锥体斜坡以及外围地区的观察，特别是 1993 年在双目峰—圆池一带的浅钻揭露，表明天池火山在近代至少发生过两次大规模的浮岩降落堆积。以下暂以典型产地命名，分别简要描述这些浮岩降落堆积。

(1) 天文峰浮岩降落堆积

厚约 30—50m，直接覆于粗面岩之上，此浮岩为浅褐黄、浅黄至灰白色，粒度大都介于 0.5—16cm 之间，最大者长轴可达 60cm，而最大的粗面岩岩屑可达 260cm。缺乏细粒碎屑是其显著特点。剖面中碎屑粒度、岩屑含量、颜色与熔结强度均有一定变化，反映喷发时岩浆碎屑化程度、围岩碎屑加入量及堆积温度有一定变化。但总体上看碎屑物粒度在横向上较稳定，属布里尼式及次布里尼降落堆积。天文峰浮岩堆积上部有约 1m 厚的灰黑色浮岩，最上部是厚不足 50cm 紫色凝灰熔岩。这种浅黄褐色至灰白色的浮岩在火山口缘的许多地方都可看到，天文峰—气象站一带，被气象站碱流岩质碎屑—熔岩流及其上的灰白色浮岩所覆盖。在五号界一带的朝鲜一侧，可以看到灰白色浮岩覆盖于浅黄色浮岩堆积之上。在天池东约 18km 双目峰一带，经浅钻揭露有两次浮岩降落堆积及两次碎屑流堆积，其间有一层约 20cm 厚的淤泥层（图 2）。第一层覆于玄武岩之上的浅黄褐色浮岩厚约 2m，其岩性与天文峰浮岩堆积类似。但其厚度及粒度（最大粒度 10cm）明显变小，且缺乏岩屑。这种浮岩之上是厚不足 1m 的碎屑流，再上是 2.2m 次生碎屑堆积。圆池钻孔所见与双目峰钻孔所见类似，只是缺失浮岩堆积之上的碎屑流（见图 2）。刘祥等（1994，见本文集）在赤峰圆池一带，也划分出赤峰期降落堆积和碎屑流以及圆池期降落堆积和碎屑流，这与我们在双目峰和圆池钻孔中观察结果一致。

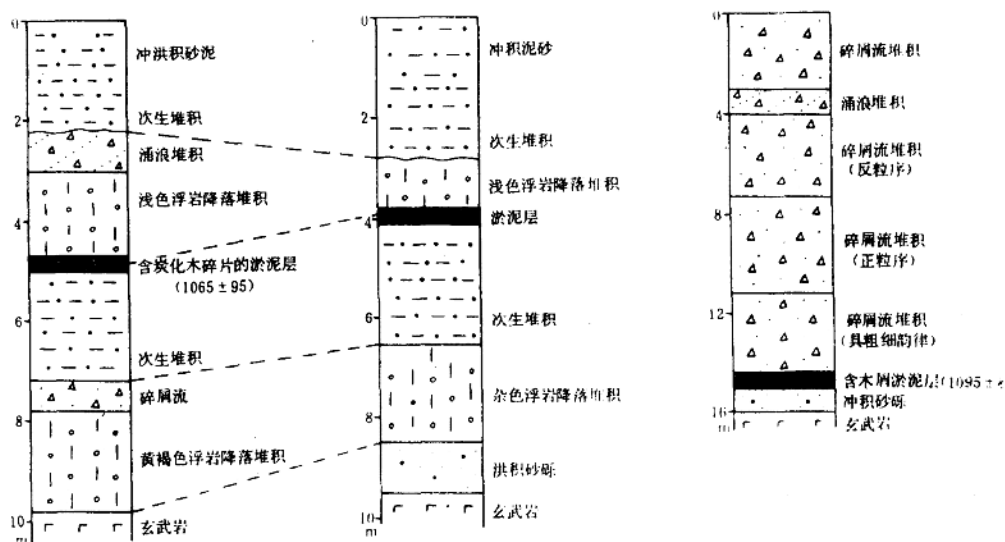


图 2 双目峰—圆池—三道白河钻孔柱状图

(2) 圆池浮岩降落堆积

这就是我们在图中看到的淤泥层之上的浮岩堆积, 厚为 1.7m, 最大浮岩直径可达 10cm, 其上覆有约 0.8m 涌浪堆积, 再上是厚达 2m 的次生堆积物。圆池钻孔中所见第二层浮岩厚度约 1m, 其上的碎屑流堆积缺失, 可能是后期剥蚀所致。刘祥等在赤峰、圆池一带见到的第二期浮岩堆积, 命名为圆池浮岩降落堆积, 我们采用这一命名。在天池火山口缘诸山峰, 特别是朝鲜一侧诸峰最上部, 往往覆盖这一种灰白色的浮岩降落堆积, 在五号界以南火山口缘山峰最上部可见灰白色浮岩堆积, 厚达 70m, 而在火山锥东北坡平缓的阶坡上, 现在保留的可见厚度仍可达 50m。在气象站平台上, 灰白色浮岩覆盖在碱流岩质碎屑—熔岩流之上, 而后者又覆于天文峰浮岩堆积之上。这种浅色浮岩堆积在天池火山周围广大地区普遍存在, 其厚度及粒度均随距火山口距离加大而变小。现今火山口缘灰白色浮岩最大厚度为 70m, 而在火山口以东 60km 的广坪, 这种浮岩的厚度仅 10cm, 最大粒度 0.5cm。在火山口东南侧顺鸭绿江而上, 沿途也可见到此期浮岩堆积厚度与粒度的系统变化, 南距天池火山口约 30km 的红头山上仍保存有约 10cm 厚、粒度 0.5—4cm 的灰白色浮岩降落堆积。Machida et al.^[5]报道, 远在天池火山以东 1000km 之外的日本九州岛北部和北海道南部小占目 (Tomakomai) 一带的碱流岩质浮岩火山灰层的最大厚度为 5cm, 其平均最大粒度为 0.2mm, 这一火山灰层在日本海北部一系列钻孔中也被鉴定出, 其厚度向西至长白山天池方向增大, 最大厚度达 16cm。他们根据这一火山灰的物质组成 (浅色碱性玻璃及少量碱性长石霓辉石晶体), 产出层位及其年代限制, 以及其厚度变化趋势等, 确认这一层火山灰来自长白山天池火山的一次近代主喷发。我们认为 Machida et al.^[5]的这些资料和推论是可信的。

3. 火山碎屑流堆积

除浮岩降落堆积外, 火山碎屑流堆积是天池火山近代喷发物中另一类大体积喷发物。它们现今主要沿天池火山锥四周沟谷地带分布, 但在火山锥斜坡、冲洪积扇及某些平坦地段, 也仍可见到, 但厚度不大。很可能最初分布于锥体斜坡的碎屑流, 都已被冲刷殆尽, 而仅在低洼沟谷地带得以保存。其中以二道白河、槽子河及鸭绿江上游保存的碎屑流厚度最大。鸭绿江上游碎屑流最大厚度可达 100m, 主要由灰白色浮岩块及灰黑色火山灰以及少量岩屑和晶屑组成, 有不太紧密牢固的热粘结。其直立节理面在鸭绿江两岸形成陡峭的峡谷壁, 最上部经侵蚀成参差不齐的虎牙状或驼峰状, 在两岸绿树衬托下蔚为奇观。二道白河碎屑流的可见最大厚度约 60m, 由粗面岩质及碱流岩质岩屑、浆屑、玻璃屑及少量长石晶屑组成, 浮岩块较少见, 岩石有较紧密的热粘结。沿河流中心线, 碎屑流沿节理面张裂形成锯齿状裂开, 白河水沿此裂口流泄, 形成峡谷或暗河。三道白河碎屑流与二道白河所见相似, 但厚度小得多。在天池公路与三道白河交会处, 通过浅钻揭示的碎屑流剖面如图 2 所示, 表明碎屑流覆于含木屑的砂泥层之上。显然, 这些木屑是由碎屑流摧毁的树木被掩埋的, 其 ^{14}C 年龄为 $1095 \pm 80\text{a}$, 可以代表这次碎屑流形成的年代。这与老维东林场黄褐色碎屑流中炭化木的 ^{14}C 年龄 $1260 \pm 70\text{a}$ 相近似。

所有在天池火山锥北坡及东北坡的沟谷中, 以及西北坡槽子河上游的碎屑流, 均与二道白河及三道白河碎屑流相似, 故将此类碎屑流称之为二道白河碎屑流。而在天池火山锥南西坡的鸭绿江上游和锦江上游等一些河谷中的碎屑流, 在颜色及碎屑组成上与二道白河碎屑流明显不同, 故将其命名为鸭绿江碎屑流。目前尚未获得鸭绿江碎屑流的年代证据, 但从其中普遍含灰白色浮岩块判断, 有可能与双目峰—圆池钻孔中所见到的上部浮岩降落

堆积和碎屑流堆积相当。在上述碎屑流堆积剖面中，还可以识别出规模不大的块灰流堆积、灰云浪堆积和涌浪堆积。在天池火山锥北坡黑风口一带，还见有一“滞后角砾岩”堆积。这是一种碎屑流的近源相，碎屑成分除浮岩外，还有大量粗面岩碱流岩和黑曜岩碎屑，最大角砾 45cm。在黑风口南约 100—300m 处公路旁，这种“滞后角砾岩”被堆积土壤草甸所覆盖，在其中可找到炭化木，一般为直径不大的炭化木，测得其 ^{14}C 年龄为 $4105 \pm 90\text{a}$ ，表明为天池火山一次较早的喷发产物。当时该地带应有林木生长，而现今已属高山苔原带，距现今的岳桦林带的高程至少有 300m，这意味着自距今 4105 年以来，天池火山已上升了 300m 以上。

4. 气象站碱流岩质熔岩—碎屑流堆积

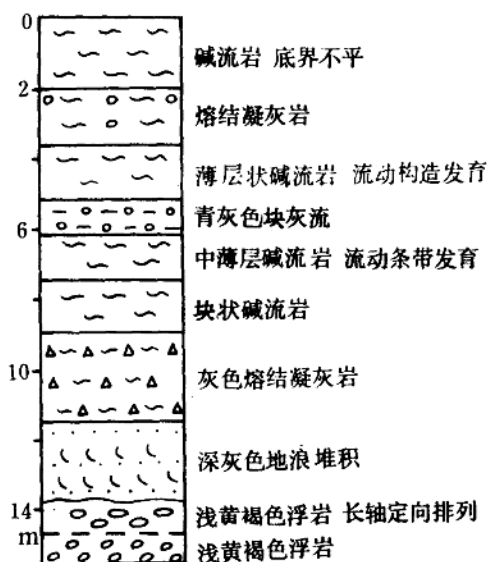


图 3 气象站碱流岩质—熔结凝灰岩柱状图

在气象站一带的碱流岩质塑变熔岩—熔结凝灰岩（依格尼姆岩）流呈条带状分布于气象站北部山脊上，宏观及航片上都可看出它顺山脊向北流淌的卷曲状波浪，波幅 500—800m，波峰 50—80m，其中的流动褶皱十分发育，为气泡化和碎屑化程度甚低的粘性熔岩—碎屑流流动的结果。在气象站东沟测得气象站碱流岩质熔岩—碎屑流的剖面如图 3 所示，剖面底部浅黄褐色浮岩堆积物与天文峰浮岩堆积相当。前已指出，在气象站碱流岩之上覆有灰白色的浮岩堆积。从天文峰一带向白云峰、青石峰、五号界一带远眺，可以看出一层灰黑

色的与气象站碱流岩质熔岩—碎屑流相类似的岩层覆盖在山峰的上部，其上又为灰白色浮岩所覆盖。

5. 次生火山碎屑堆积

这是指浮岩降落堆积和碎屑流堆积形成后，由后期的坡洪积、冰雪融化、暴雨等雨水冲刷搬运而再次或多次停积的碎屑物。由于浮岩质轻，且岩块之间缺乏粘结，多数碎屑流也较疏松，因而极易被上述多种后期作用所搬运，由火山锥斜坡地带向四周较平缓开阔地带或低洼地带堆积。又由于这种次生碎屑堆积物的碎屑，几乎全都来自那些原生的火山碎屑岩，这给识别次生碎屑堆积造成很大困难。但是次生碎屑堆积在天池火山四周至少 30km 范围内，有相当广泛的分布，如在和平营子、和平林场一带开采浮岩开挖的断面中可以看到这种次生碎屑堆积厚达 3m 以上，由大小不等的有一些滚圆的浅色浮岩及灰色砂土混杂堆积，其间有时出现流水搬运的细砂层纹。在小沙河一带，这种次生碎屑堆积物往往混有红土，其中常可见到炭化木的碎屑。在双目峰、圆池的钻孔柱状图中，我们也能分

别出上下两层次碎屑堆积, 它们都显示有多次重复的粗细碎屑互层的“韵律”, 浮岩砾石有一定磨圆是与其原生浮岩降落堆积和碎屑流堆积的显著区别。Machida et al.^[16]在圆池 11 号参考剖面上部的 E 层 (由多次浮岩堆积和碎屑流堆积组成), 很可能相当于我们在双目峰圆池钻孔中看到的上部次生碎屑堆积。

6. 火山岩屑流和泥石流

我们观察证实了 Machida 等^[16]对二道白河镇岩屑流 (debris flow) 堆积的描述。这种岩屑流由巨大的熔岩漂砾和少量浮岩块组成, 它可能是由于喷发前或喷发早期锥体斜坡的崩塌, 这些崩塌物加上天池水的大量溢出混合而迅猛顺流排放, 或停积于二道白河两岸, 实际上从二道白河镇到两江口一带沿河阶地上几乎都可看到这种岩屑流堆积, 但愈向下其中浮岩砾石比例逐渐增加。以致在两江所见到的岩屑流 (由圆化的浮岩和火山渣、火山砂、火山灰以及圆化的非火山砾石组成, 浮岩可占 30%—50%, 其中还有小的炭化木碎屑) 被 Machida 等^[16]另称为火山泥石流堆积 (mudflow deposit), 其厚度达 10m。自两江以下, 过白山、红石水库电站及丰满水库电站, 直到吉林市以北的第二松花江两岸一级阶地上, 断续分布厚达 5—10m 的泥石流称之为高密度流。其碎屑均遭圆化, 90% 以上均为浅色浮岩, 现在被当地开采。显然, 两江所看到的泥石流是在已经产生了大量火山喷发物之后才发生的。堆积物中浮岩比例的增加应与其质轻易于随水飘流有关。二道白河及第二松花江两岸厚大的火山泥石流和岩屑流堆积向我们提出一个极为严重的火山灾害问题, 即如果天池火山再次发生本文所描述的那种大规模喷发, 沿两岸的城镇建筑将会受到多大破坏? 特别是白山水库电站、红石水库电站、丰满水库电站是否会因这种迅猛巨大的泥石流冲击而决口, 并导致下游一系列的洪水泛滥成灾? 这是我们在对天池火山今后的火山灾害预测及预防对策中必须严肃对待的问题。

除二道白河、第二松花江以外, 在鸭绿江上游两岸阶地上, 也见有这种火山泥石流。在横山站以北约 10km 的鸭绿江岸, 岩屑流厚可达 10m 以上, 而在长白县附近的鸭绿江岸, 火山泥石流的厚度仍可达 10m 左右。很可能与火山碎屑流一样, 在天池火山四周现今主要河流两岸都有可能看到火山泥石流。

六、天池火山近代大喷发的年代及喷发物体积估计

这里要讨论的是近代喷发中的主喷发, 也就是产生大量碎屑流的大规模喷发的年代。前已指出, 我们的工作特别是在双目峰、圆池钻孔揭露的资料表明, 天池火山至少存在两次近代大规模爆炸式喷发。双目峰钻孔中含炭化木碎片的淤泥层的 ^{14}C 年龄 ($1065 \pm 95\text{a.BP}$), 天池公路 6km 处三道白河碎屑流底部泥砂层中木屑的 ^{14}C (1095 ± 80), 以及在天池火山东坡、北坡、南坡许多地方采集炭化木的 ^{14}C 年龄 (共 21 个 ^{14}C 年龄数据, 其中 10 个是由本次研究采样经国家地震局地质研究所 ^{14}C 实验室测定; 8 个取自黎兴国等 1987 年发表的, 另 3 个分别引自丁梦麒和刘嘉麒 1985 发表的数据) 表明, 其年龄范围在 $990 \pm 95\text{a.BP}$ 至 $1489 \pm 70\text{a.BP}$ 之间。其中有 14 个数据的 ^{14}C 年龄范围在 990 — 1200a.BP 之间。如果我们将年轻的有机物对样品的污染忽略不计, 造成已有 ^{14}C 年龄有近 500 年误差范围的主要原因, 可能是由炭化木样品在树轮中所在位置不同引起的, 而长白山区在大约 1000 年前的原始森林中, 具 300—500 年的树木, 可能是极为平常的。因此

我们认为采用现有 ^{14}C 数据中比较年轻的那些数据较为合理,也就是采用 990—1200a.BP 的 ^{14}C 年龄,代表由大规模灰白色浮岩降落堆积及三道白河等碎屑堆积所表明的一次大规模爆炸式喷发,这就是我们在双目峰钻孔中所见到的含炭化木碎片淤泥层之上由灰白色浮岩及碎屑流所代表的那次喷发。Machida 等^[16]将产于日本北部及日本海钻孔中 B-Tm 火山灰层的年龄限制在公元 915—1334 年间,以后他们根据新的考古资料及上覆有公元 915 Towada 火山灰层的事实,进一步提出 B-Tm 火山灰层所反映的长白山天池大爆发发生在公元 10 世纪。J.Gill^[18]报道取自天池火山碎屑层底部(未给出具体采样位置)炭化云杉的 ^{14}C 年龄为公元 605—871 年范围内,相当于以 1950 年为截止期的距今 1079—1345a.BP。根据同样的理由, Gill 所报道的 ^{14}C 年龄也应采用年轻的那一部分数据。这样,由我们给出的 990—1200a.BP 即公元 750—960 年的这次大喷发发生的年龄范围,实际上包括了 Machida et al., 及 Gill 等给出的年龄信息。

对于另一次大喷发,也就是双目峰钻孔中下层浅褐色浮岩以及在天文峰和其他地方见到的这种浮岩降落堆积和碎屑流堆积所表明的那次大喷发年代,目前尚未获得任何直接的年代学证据。我们只能说它是在大约距今 1200 年之前发生的。但是双目峰及圆池钻孔中所见到的淤泥层的厚度,都不大于 20cm,这或许可以作为一个判断的参数。现今在鸭绿江上游一带,发育于灰白色浮岩堆积之上的地表土壤层的厚度一般在 5—10cm 之间,而这些土壤是在上次大喷发之后大约 1000 年以来发育形成的。另一个可以参考的数据是我们从黑风口以南滞后角砾岩中获得的炭化木 $4105 \pm 80\text{a.BP}$ 的 ^{14}C 年龄。

J.Gill et al.^[18]曾将长白山天池火山的大喷发与格陵兰冰芯中记录的公元 626 年事件相联系。虽然公元 626 年包含在现有的 ^{14}C 年龄跨度之内,但是如前面所分析讨论的那样,我们更倾向于将天池火山最近的一次大喷发限制在公元 750—969 年范围内。而在格陵兰冰芯记录中^[24],公元 750—960 年间也还有一系列未知事件的强酸度峰有待对应。对大直径炭化木边部和中心部分的精确 ^{14}C 定年以及对火山玻璃的裂变径迹定年有可能获得对公元 750—969 年间大喷发的进一步年代信息。

关于公元 750—960 年间长白山天池火山大喷发物体积估计, Machida 等^[6,16]估计火山周围 2000km^2 范围内的碎屑流和浮岩降落堆积共约 20km^3 ,而远处的 B-Tm 火山灰的体积大于 50km^3 。J.Gill 等^[18]认为,天池火山这次大喷发抛向空中的全部岩石体积应大于 175km^3 。他们主要根据由天池火山至日本北部大约 1000km 距离内火山灰厚度变化,并与 1815 年印尼 Tambora 火山大喷发的喷发物在同样距离内厚度值的对比。在日本北部 B-Tm 火山灰层厚度是 5cm,而同等距离的 Tambora 火山灰的厚度是 1cm, Tambora 火山 1815 年大喷发的总体积被估计为 175km^3 ^[25],因而长白山天池火山的这次大喷发体积应大于 175km^3 。

当比较具体地估计天池火山公元 750—960 年间大喷发体积时,应当对该次喷发的碎屑物厚度做出估计,现在于火山口附近观察到的不论是浮岩降落堆积还是碎屑流堆积,都是经过约 1000 年的剥蚀之后保留下来的。其原始厚度肯定要比现在看到的厚度要大,因此,将分布于天池火山四周广大地区的次生碎屑堆积包括在喷发物总体积内是理所当然。此外,天池火山朝鲜一侧即火山的东侧及东南侧,正处于顺风方向,碎屑喷发物应有更大的厚度。考虑到上述因素,对于碎屑流堆积和浮岩降落堆积,在火山锥及其四周 2700km^2 范围内,均取其平均厚度为 10m 计算,分别得到它们体积为 27km^3 ,共计 54km^3 。而对

于远处火山灰体积的估计,以日本北部 B-Tm 火山灰厚度为 5cm,日本北海道北部为 16cm 作为参数,由天池火山至日本北部 1000km 内的平均厚度取 15cm,并以天池火山东侧大约相当于 1/4 圆面积的扇形地带估计,则火山灰的体积为 118km^3 ,因而其总体积被估计为 172km^3 。这与坦博拉火山 1815 年的喷发体积相当。

七、喷发物中挥发分含量的估计

我们对天池火山 8 个钠闪碱流岩(包括浮岩黑曜岩等)所作的全岩分析表明,其平均烧失量为 0.84%。而对 5 个碱流岩质浮岩和黑曜岩的 F、Cl、S 和 CO_2 等挥发分的色谱分析显示,其 F 含量为 158—481ppm,平均 317ppm,Cl 平均含量为 170ppm, CO_2 为 410ppm,通常认为钠闪碱流岩浆贫水($\text{wt} < 1\%$)而富卤素^[26,27]。J.Gill^[18]据 McCurry 提供的对天池火山近代喷发物中长石斑中玻璃包裹体的电子探针分析结果,其中含有 1% 的卤素元素含量,并认为这是天池碱流岩浆中卤素含量一个低的下限。如果把碱流岩的脱气率(DEF—Degassing efficiency factor)考虑为 0.3—0.5^[28,29],他估计天池火山公元 750—960 年间的那次大喷发,释放 $2 \times 10^6\text{kt}$ 的 Cl。但是按照我们前述对 5 个浮岩和碱流岩中挥发分的分析结果,按 0.3—0.5 脱气率计算,其喷发前岩浆中 F+Cl 的含量只有 0.08%—0.11%,S 的含量(按 DEFs=0.3)为 0.0415%,考虑到长石斑晶捕获的岩浆包裹体,可能是岩浆房中更富集挥发分的部分,因而其中卤素含量高于整个岩浆房中卤素含量是可能的。但即使按我们的资料,对于 172km^3 这样巨大的喷发体积来说,其释放至大气中的 F+Cl 和 S 量也仍然是惊人的,即 F+Cl 为 $5 \times 10^4\text{kt}$,这个数量相当于全球近 170 年来产生的 CFCs(以全球每年产生 300ktCFCs 计)^[28]。这个数量也与 1815 年坦博拉火山喷发释放的 HCl 量在同一数量级内。长白山天池火山 750—960 年间喷发释放的 S 量,按前述参数计算应为 $2 \times 10^4\text{kt}$,这与 J.Gill (1992) 的估计数字相同, CO_2 的释放量为 10^5kt 量级。

显然,在一次火山喷发中有如此大量的卤素(特别是 Cl)和 S 被释放加入到大气圈,不仅会严重污染人类环境,还将造成臭氧层的严重破坏。何况硫酸雾在大气中将加剧 Cl 的作用,加剧臭氧的亏损^[30,31]从而导致全球气候变化。如此大量的 CO_2 释放至大气层中,也将对全球环境和气候变化产生影响。

小 结

长白山天池火山是一座巨大的近代活动火山,全新世以来,至少发生过两次大规模喷发。其中发生于公元 750—960 年间的大喷发,按其碎屑喷发物分布的范围和体积,是一次猛烈的大规模爆炸喷发。现今在天池火山周围 30km 范围内仍可看到厚在数公尺至数十公尺以上的这次大喷发形成的碎屑物。以及由这次喷发所毁灭的森林的炭化木残骸。而这次喷发的火山泥石流,沿松花江源直至 300km 之外,仍有 5—10m 厚;这不能不引起我们对该火山未来可能发生的喷发的高度关注。考虑到在这次大喷发之前,该火山有过多次喷发,而在其后,按现有历史记载,还发生过若干次较小规模喷发,因此,中外火山学家及本文作者等提出的“长白山天池火山是一座具有潜在灾害性喷发危险的现代活动火山”的