

长白山天池火山气体对环境的影响 及潜在火山灾害研究*

郭正府** 刘嘉麒 汉景泰 贺怀宇 代国良 游海涛

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 长白山天池火山位于中国和朝鲜两国边境线上, 借助国际合作, 对分布于中朝两国境内的天池火山喷发物进行了较系统的野外考查, 选择层序完整的火山喷发物剖面, 对天池火山进行整体研究. 在此基础上, 系统测定了天池火山历史时期大喷发从早期到晚期喷出的气体成分和含量, 进而探讨了该火山气体对环境的影响及其造成的火山灾害, 并利用天池火山气体成分和含量开展了该火山未来喷发危险性及其潜在火山灾害预测研究, 这一方法对进一步开展我国大陆活火山的喷发预测及其火山灾害防御研究具有重要意义.

关键词 长白山天池火山 火山气体 环境 火山灾害 火山监测

以往大量的研究表明, 我国东北长白山天池火山是具有潜在喷发危险的巨型活火山^[1~3]. 长白山及其周围地区自然资源丰富, 那里有茂密的森林和许多重要设施(如城镇、水电站、水库和工厂等), 并且居住着许多城乡居民, 在缺乏科学预测和防范措施的情况下, 一旦火山喷发将会给人民的生命财产造成严重灾害和巨大经济损失, 因此应加强力量进行火山监测和预测研究.

长白山天池火山在历史时期曾发生过一次大规模的喷发活动, 通常我国火山学界将这次喷发称为长白山天池火山历史时期大喷发^[1~3], 天池火山这次喷发的规模很大, 它喷出的火山灰飘落到 1000 km 以

外的日本^[4,5], 因此造成的火山灾害也很严重, 而且此次喷发对大气环境造成过明显的影响, 它喷出的火山气体导致了当时大气圈中 SO_4^{2-} 浓度的显著增加, 这在格陵兰冰芯(GISP2)研究中已经得到证实^[6,7]. 那末, 目前我国火山学界需要回答的科学问题是, 天池火山如此大规模的火山喷发活动在将来是否还会出现?

以往对天池火山历史时期大喷发开展了许多研究工作, 主要侧重于火山地质学^[8]、岩石学^[9]、地球化学^[9,10]和火山喷发动力学^[10]方面的研究, 而对此次大喷发造成的环境与灾害效应研究相对较薄弱. 以往涉及此次喷发对环境的影响的研究仅仅是报道了部

2004-12-20 收稿, 2005-05-11 收修改稿

* 国家自然科学基金项目(批准号: 40372045)和中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX3-SW-145)共同资助

** E-mail: zhengfuguo@hotmail.com

分喷发物样品挥发分气体含量的测试结果, 这些结果证实了天池火山喷发物中岩浆包裹体的挥发分含量高于电子探针的检测下线^[11,12], 因此可以采用电子探针方法定量测定天池火山喷出气体的成分与含量, 前人获得的这一结论为本研究的开展提供了可能性。然而, 迄今尚没有天池火山历史时期大喷发从早期到晚期喷出的火山气体成分和含量变化方面的系统报道, 这方面的研究不仅可以为评价天池火山此次喷发造成的火山灾害及其对环境的影响提供依据, 而且还可以为预测天池火山的未来喷发提供有价值的资料。

本文采用国际上先进的测试技术系统测定了天池火山喷发从早期到晚期喷出气体成分和含量的变化特征, 对长白山天池火山历史时期大喷发对环境的影响和造成的火山灾害进行科学评估, 开展了天池火山的喷发预测研究, 为科学防御和减轻天池火山未来喷发灾害提供依据。另外, 本文的研究成果也可以为我国其他活火山区(例如, 黑龙江五大连池火山区和云南腾冲火山区等)的火山喷发预测研究提供有价值的启示。

1 长白山天池火山历史时期大喷发的年龄

位于东北吉林省的长白山天池火山是目前我国境内保存最完整的巨型火山之一^[3,10]。总体上, 长白山区新生代以来的岩浆活动形成了三类成分不同的火山岩^[9,10]: 第三纪以溢流为主的玄武质火山岩构成了长白山天池火山锥的底座, 更新世喷出的粗面质-碱流质火山岩构成了天池火山锥体, 全新世(包括历史时期)以来的爆发性火山活动形成了大规模以碱流质成分为主的浮岩, 它们构成天池火山口湖(即天池)周围的山峰。以往研究^[1,3,8,10]表明, 在历史时期长白山天池火山曾有过规模不等的数次喷发, 其中本文所研究的天池火山历史时期大喷发的规模最大^[1~3], 此次喷发形成的火山空落浮岩与火山碎屑流厚度大, 空间分布广, 主要位于中国和朝鲜两国境内。它们以灰、灰白色和褐黄色为主, 由火山玻璃和斑晶矿物(橄榄石、辉石、歪长石和石英等)组成, 岩石气孔构造十分发育, 呈泡沫状, 比重轻。目前国内外不同的研究者对长白山天池火山历史时期大喷发的时间认

识尚不一致, 例如, Gill等^[6]认为天池火山这次大规模喷发的年龄为 600~1000 AD; Zielinski等^[7]通过对格陵兰冰芯(GISP2)SO₄²⁻浓度研究认为天池火山这次喷发发生在公元 1026 年; 刘若新等^[2]获得的¹⁴C年龄结果表明天池火山此次喷发发生在公元 1215 年; 刘嘉麒^[3]认为此次大喷发发生在约 1200 年前; Horn和Schmincke^[11]通过¹⁴C定年研究认为这次大喷发发生在公元 969 年; 崔钟燮等^[13]通过对历史文献的考证研究认为此次大喷发发生在公元 1199~1200 年。但是从已发表的年龄数据看, 绝大多数的¹⁴C定年研究结果表明长白山天池火山在历史时期的这次大喷发发生在距今 910~1435 年间^[3,10,12]。

以往研究^[14]表明, 火山碎屑流堆积物是火山喷发柱垮塌形成的产物, 它往往以湍流的形式高速流动, 造成火山碎屑物在地表流动过程中相互之间充分混合, 因此, 很难根据火山碎屑流的剖面成分变化反演从早到晚岩浆房喷出岩浆和气体成分的演化特征。然而, 火山空落浮岩是普林尼式爆发喷出的火山碎屑直接降落在地表的结果^[14], 因此, 与火山碎屑流相比, 火山空落浮岩层野外剖面的成分变化能很好地反演从早到晚岩浆房喷出岩浆和气体成分的演化特征。我们通过对位于朝鲜一侧的天池火山喷发物野外实地考察发现, 与我国一侧天池火山喷发物的野外出露情况相比, 位于朝鲜一侧的喷发物中火山碎屑流的空间分布较局限, 而火山空落浮岩层的出露面积较大, 在剖面层序上火山空落浮岩出露完整, 是研究天池火山历史时期大喷发从早到晚喷出的熔浆成分和挥发分气体含量演变特征及其环境、灾害效应的理想场所。本文是先后 3 次(2000 年, 2002 年和 2004 年)对朝鲜境内的天池火山喷发物野外考察、取样和开展实验室测试研究的报道。

2 样品选择及其测试方法

本研究的所有样品均取自朝鲜境内天池火山东南一侧大渊池峰附近的火山空落浮岩剖面(图 1), 该剖面火山空落浮岩厚度大, 野外实测的浮岩厚度为 2.7 m, 并且层序完整、样品新鲜、保存较好, 未发现后期火山碎屑流侵蚀现象。而我国境内天池火山此次大喷发的空落浮岩(不包括火山碎屑流堆积物)最大

实测厚度仅为 1.2 m^[8]。因此, 朝鲜境内的大渊池峰剖面(图 1)为我们开展天池火山历史时期大喷发从早期到晚期喷出的挥发分气体含量变化特征研究提供了理想的野外样品方面的保证。该剖面自下至上浮岩的颜色、粒度、形态和晶屑含量均呈现出两个旋回式变化, 在每个旋回中, 从早到晚, 浮岩的颜色呈现出由浅黄、褐黄色逐渐演变为灰、灰白色, 浮岩的粒度呈现出由粗到细, 浮岩的形态由磨圆度较好到磨圆度相对较差, 晶屑的含量由高到低。

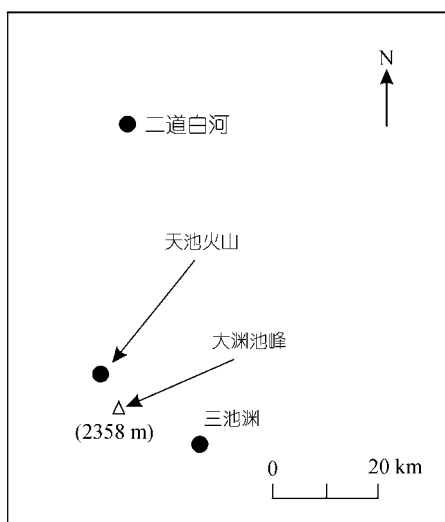


图 1 大渊池峰剖面的地理位置

在实验室挑选出理想的待测样品是进行该项研究的另一个重要环节, 理想样品是指浮岩斑晶矿物中原生的、没有遭到后期破坏的、经快速冷凝的岩浆包裹体和与主矿物共存的新鲜基质玻璃^[11,12,15]。本文采用如下操作程序挑选用于实验室测试的理想样品: (1) 将长白山天池火山浮岩磨制成光学薄片, 通过显微镜观察和岩相学分析, 确定岩浆中主要斑晶矿物的结晶顺序, 即橄榄石>辉石>歪长石和石英。(2) 以往研究^[11,12]表明, 不同世代主矿物内岩浆包裹体的挥发分成分存在差别, 位于晚期结晶主矿物边缘与基质玻璃的主元素成分相近的原生岩浆包裹体的挥发分组成可近似代表临近喷发前岩浆中挥发分的含量, 因为晚期结晶的主矿物中岩浆包裹体组成与喷发前熔浆成分之间的热力学梯度和成分梯度较小, 组分发生扩散再平衡作用的时间较短, 挥发分扩散速率低, 对包裹体成分影响小。因此, 我们将浮岩样品在

玛瑙研钵中研碎, 在双目镜下挑选新鲜的、解理和裂隙不发育的晚期结晶斑晶矿物(歪长石和石英)及其周围新鲜的基质玻璃, 依次用超声波、稀草酸和蒸馏水清洗样品表面, 然后观察矿物内包裹体的分布和含量, 寻找理想的岩浆包裹体和基质玻璃样品。(3) 将含有原生岩浆包裹体的晚期结晶的斑晶矿物和共存的基质玻璃用树胶镶嵌在专用样品槽内, 抛磨样品并同时不断地进行显微镜观察, 直至获得包裹体的最大横截面进行测试。利用电子探针测试岩浆包裹体和新鲜基质玻璃成分所选定的工作电压 15 kV、电流 5~15 nA、电子束直径 1~10 μm (岩浆包裹体)和 10~20 μm (基质玻璃)。详细的实验室操作程序、测试方法描述、测试标样的选择和检测下限可参考文献^[11,12,16,17]。重复测量标样获得的相对测试精度(relative analytical precision)如下: $F < 2\%$, $Cl < 4\%$, $S < 5\%$ 。以往研究表明, 岩浆包裹体的成分可代表喷发前熔浆的组成, 基质玻璃中挥发分的成分可以代表喷发后熔浆中残留的火山气体含量, 岩浆包裹体与基质玻璃之间挥发分含量之差可代表火山喷出气体的含量^[11,12,17]。

3 测试结果

晚期斑晶(歪长石和石英)中岩浆包裹体和共存基质玻璃的电子探针分析结果见表 1。通过计算岩浆包裹体与共存的基质玻璃之间挥发分含量差获得的火山喷出气体含量列于表 2。水的含量通过“差异法”计算^[11,12,17]。与世界上其他大规模爆发性活火山(Pinatubo, Tambora等)喷发相比(表 2), 天池火山历史时期大喷发喷出的 S、F 和 Cl 的含量相对较高。按照空落浮岩样品在野外剖面的位置, 绘制的天池火山喷出气体(S、F、Cl 和 H_2O)百分含量变化特征图(图 2)表明, 从早到晚天池火山喷出气体(S、F、Cl 和 H_2O)的含量是存在差别的。

4 讨论

4.1 天池火山旋回式喷发的主要特征

从早期到晚期, 天池火山历史时期大喷发喷出气体的含量呈现出两个旋回式变化, 并且这两个旋回火山喷出气体成分变化趋势是一致的(图 2)。具体

表 1 天池火山喷发物结晶晚期斑晶中岩浆包裹体和共存基质玻璃的成分 (wt%)^{a)}

样号	层位/m	测试样品	旋回	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	F	Cl	S	H ₂ O	总量
X01	0.1	歪长石	2	68.46	0.32	11.68	4.52	0.07	0.04	0.45	5.68	5.49	0.04	0.33	0.36	0.09	2.47	97.53
X02	0.2	石英	2	69.02	0.33	10.95	4.63	0.09	0.04	0.46	5.59	5.70	0.04	0.31	0.32	0.07	2.45	97.55
X03	0.3	歪长石	2	69.76	0.34	11.66	4.40	0.05	0.03	0.39	5.29	4.87	0.03	0.36	0.35	0.06	2.41	97.59
X04	0.4	石英	2	71.38	0.33	10.58	4.05	0.07	0.02	0.23	4.76	5.23	0.04	0.39	0.40	0.04	2.48	97.52
X05	0.5	歪长石	2	70.55	0.32	11.07	4.48	0.05	0.03	0.38	4.78	4.93	0.03	0.38	0.41	0.05	2.54	97.46
X06	0.6	石英	2	71.82	0.31	10.70	4.28	0.06	0.03	0.27	4.75	4.30	0.03	0.42	0.38	0.03	2.62	97.38
X07	0.7	石英	2	71.49	0.24	10.89	3.97	0.03	0.02	0.29	4.62	4.58	0.05	0.40	0.49	0.04	2.89	97.11
X08	0.8	歪长石	2	71.77	0.28	10.69	4.59	0.04	0.03	0.33	4.28	4.20	0.03	0.45	0.52	0.02	2.77	97.23
X09	0.9	石英	2	72.66	0.23	10.64	3.43	0.05	0.02	0.21	4.56	4.38	0.04	0.46	0.57	0.03	2.72	97.28
X10	1.0	歪长石	2	72.74	0.15	10.17	3.66	0.02	0.02	0.22	4.47	4.52	0.04	0.48	0.59	0.03	2.89	97.11
X11	1.1	石英	2	73.26	0.12	10.23	3.19	0.04	0.01	0.22	4.31	4.26	0.03	0.52	0.58	0.02	3.21	96.79
X12	1.2	石英	2	73.89	0.18	10.45	2.36	0.03	0.02	0.12	4.36	4.03	0.02	0.49	0.62	0.02	3.41	96.59
X04	0.4	玻璃	2	73.68	0.20	10.98	3.87	0.04	0.02	0.17	4.83	4.57	0.03	0.18	0.23	0.02	1.18	98.82
X09	0.9	玻璃	2	75.31	0.19	10.33	2.69	0.03	0.01	0.15	4.66	4.50	0.02	0.20	0.25	0.02	1.64	98.36
H14	1.4	歪长石	1	70.08	0.35	10.72	4.64	0.05	0.04	0.33	5.41	4.93	0.03	0.34	0.37	0.05	2.66	97.34
H15	1.5	石英	1	70.56	0.33	10.64	4.57	0.06	0.03	0.31	4.95	4.89	0.04	0.35	0.38	0.06	2.83	97.17
H16	1.6	歪长石	1	71.20	0.29	10.86	4.35	0.05	0.02	0.29	4.75	4.63	0.04	0.36	0.37	0.04	2.75	97.25
H17	1.7	石英	1	71.88	0.33	10.57	3.90	0.04	0.03	0.26	4.59	4.54	0.03	0.38	0.45	0.05	2.95	97.05
H18	1.8	歪长石	1	71.69	0.27	10.65	4.16	0.06	0.03	0.28	4.68	4.42	0.03	0.41	0.46	0.05	2.81	97.19
H19	1.9	歪长石	1	72.27	0.23	10.48	3.56	0.04	0.02	0.24	4.61	4.45	0.04	0.40	0.51	0.04	3.11	96.89
H20	2.0	石英	1	72.48	0.20	10.17	3.66	0.04	0.01	0.20	4.55	4.50	0.03	0.40	0.50	0.04	3.22	96.78
H21	2.1	歪长石	1	72.05	0.21	10.25	3.57	0.03	0.02	0.22	4.42	4.56	0.04	0.43	0.52	0.03	3.65	96.35
H22	2.2	石英	1	72.33	0.17	10.29	2.99	0.02	0.02	0.26	4.52	4.51	0.03	0.46	0.56	0.03	3.81	96.19
H23	2.3	歪长石	1	71.49	0.23	10.55	3.38	0.04	0.03	0.31	4.66	4.49	0.02	0.45	0.55	0.02	3.78	96.22
H24	2.4	歪长石	1	72.68	0.18	10.33	2.79	0.03	0.02	0.20	4.36	4.51	0.03	0.47	0.55	0.02	3.83	96.17
H25	2.5	石英	1	73.01	0.15	10.27	2.80	0.02	0.02	0.18	4.40	4.19	0.03	0.49	0.56	0.02	3.86	96.14
H26	2.6	石英	1	73.12	0.16	10.33	2.67	0.02	0.01	0.14	4.25	4.12	0.02	0.48	0.58	0.03	4.07	95.93
H24	2.4	玻璃	1	74.20	0.18	10.87	2.80	0.03	0.01	0.13	5.12	4.78	0.03	0.20	0.25	0.02	1.38	98.62
H19	1.9	玻璃	1	73.68	0.22	10.92	3.04	0.02	0.02	0.12	5.06	4.91	0.01	0.23	0.22	0.02	1.53	98.47

a) 测试仪器: Cameca SX51; 测试单位: 英国 Leeds 大学地球科学与环境科学学院; 测试者: 郭正府

表 2 天池火山喷出气体的成分和含量(wt %) ^{a)}

样号	测试样品	旋回	F	Cl	S	H ₂ O
X01	歪长石	2	0.14	0.12	0.07	1.06
X02	石英	2	0.12	0.08	0.05	1.04
X03	歪长石	2	0.17	0.11	0.04	1.00
X04	石英	2	0.20	0.16	0.02	1.07
X05	歪长石	2	0.19	0.17	0.03	1.13
X06	石英	2	0.23	0.14	0.01	1.21
X07	石英	2	0.21	0.25	0.02	1.48
X08	歪长石	2	0.26	0.28	0.00	1.36
X09	石英	2	0.27	0.33	0.01	1.31
X10	歪长石	2	0.29	0.35	0.01	1.48
X11	石英	2	0.33	0.34	0.00	1.80
X12	石英	2	0.30	0.38	0.00	2.00
H14	歪长石	1	0.13	0.14	0.03	1.21
H15	石英	1	0.14	0.15	0.04	1.38
H16	歪长石	1	0.15	0.14	0.02	1.30
H17	石英	1	0.17	0.22	0.03	1.49
H18	歪长石	1	0.20	0.23	0.03	1.36
H19	歪长石	1	0.19	0.28	0.02	1.65
H20	石英	1	0.19	0.27	0.02	1.76
H21	歪长石	1	0.22	0.29	0.01	2.20
H22	石英	1	0.25	0.33	0.01	2.36
H23	歪长石	1	0.24	0.32	0.00	2.33
H24	歪长石	1	0.26	0.32	0.00	2.38
H25	石英	1	0.28	0.33	0.00	2.41
H26	石英	1	0.27	0.35	0.01	2.62
Agung 火山	印度尼西亚			0.149	0.038	1.16
St. Helens 火山	美国			0.006	0.004	4.91
Krakatau 火山	印度尼西亚			0.015	0.004	3.09
Campanian 火山	意大利			0.041	0.002	0.03
Pinatubo 火山	菲律宾				0.003	4.06
Tambora 火山	印度尼西亚		0.063	0.089	0.007	3.07

a) 样号同表 1. 表中列出的世界上其他火山喷出气体的含量数据来自文献 [15,16,18]

表现为从每一喷发旋回的早期到晚期，火山喷出的卤化物气体(F和Cl)和H₂O的含量呈降低趋势，而硫化物气体的含量呈增加趋势(图 2)；岩浆包裹体中SiO₂的含量和Cl/S的比值呈现出降低的趋势。由此可见，本文研究的天池火山历史时期大喷发由两个喷发旋回组成。对于每个喷发旋回，在SiO₂含量较高的熔浆中，Cl、F和H₂O的含量较高，S的含量较低；在SiO₂含量相对较低的熔浆中，S的含量较高，Cl、F和H₂O的含量相对较低(图 3)。以往对 1991 年喷发的菲律宾Pinatubo火山深部岩浆房探测研究和对意大利维

苏威火山长期监测结果[15,19,20]表明，火山喷发物SiO₂、Cl、F、S和H₂O含量的这种旋回式变化特征指示了岩浆喷发可能是由于岩浆房底部周期性高温玄武质熔浆注入造成的，因为相比较而言，玄武质岩浆的S含量较高，Cl、F和H₂O的含量较低；而中酸性岩浆S含量较低，Cl、F和H₂O的含量较高[15]。因此，我们可以认为，天池火山喷发物成分表现出从早到晚旋回式的变化趋势(图 2 和 3)说明天池火山的喷发可能是由于岩浆房受到玄武质熔浆注入造成的。一方面，由于岩浆房底部玄武质熔浆的周期性注入，导致

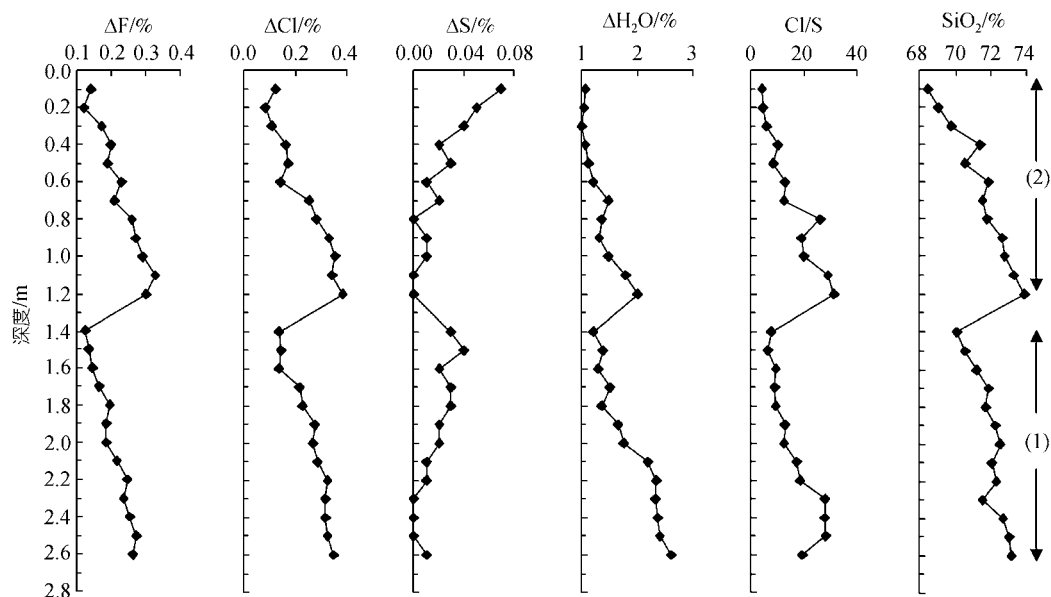
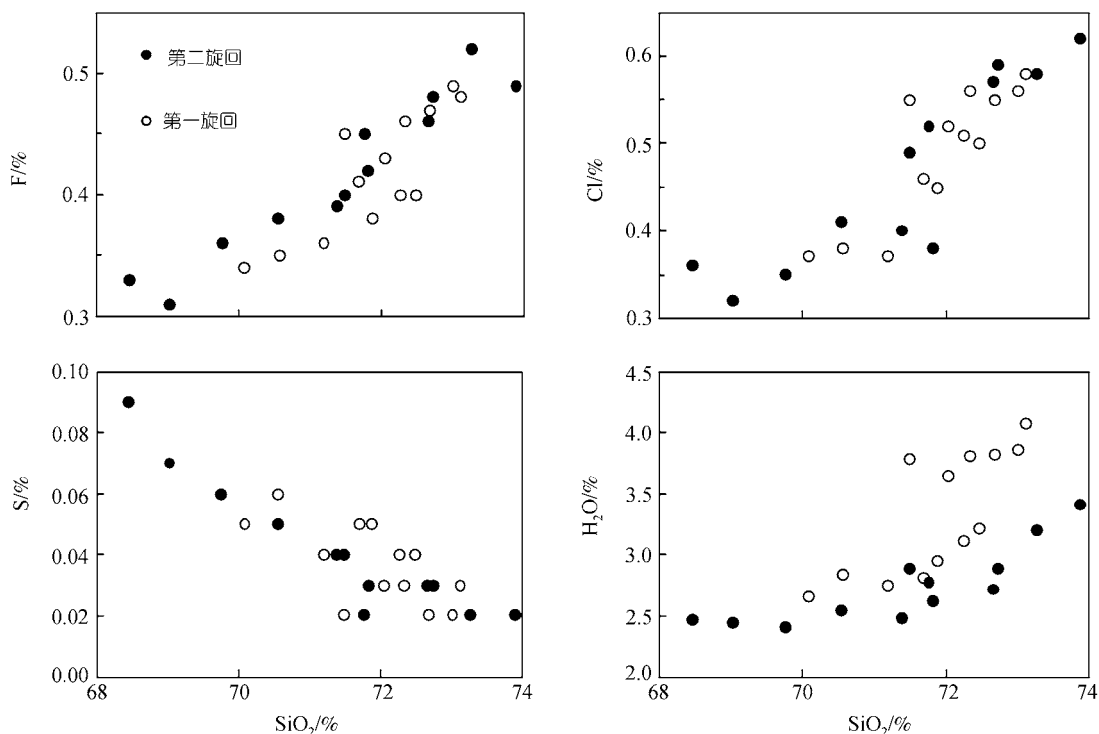


图 2 天池火山喷出气体的含量及其演变特征

(1) 第一旋回; (2) 第二旋回. ΔF , ΔCl , ΔS 和 ΔH_2O 代表火山喷出的F, Cl, S和 H_2O 含量图 3 岩浆包裹体中挥发分气体含量与 SiO_2 之间的变异关系

岩浆房从上部至下部 SiO_2 , Cl, F和 H_2O 含量呈现逐渐降低的趋势, S的含量则呈现逐渐增加的趋势; 另一

方面, 由于深部玄武质熔浆的注入会导致岩浆房热扰动, 造成岩浆房顶部 SiO_2 含量较高的熔浆首先喷出,

下部 SiO_2 含量相对较低的熔浆随后喷出, 最终形成 SiO_2 , Cl, F和S含量的旋回式变化趋势(图2和3)。

4.2 天池火山历史时期大喷发造成的火山灾害

岩浆包裹体中Cl/S比值已经被认为是衡量火山喷发强度和喷发能量的重要指示参数^[20~22]。Cl/S比值越高, 表明火山喷发强度和喷发能量就越高; Cl/S比值越低, 说明火山喷发强度和喷发能量就越低。天池火山喷发物斑晶内岩浆包裹体的Cl/S比值呈现出两个旋回式变化, 每个旋回从火山喷发的早期到晚期, 岩浆包裹体中Cl/S比值均出现降低的趋势(图2)。说明在每个喷发旋回开始时, 火山喷发强度和喷发能量较高, 随着火山喷发的进行, 火山喷发强度和喷发能量会逐渐减小。实验室模拟研究和对活火山喷发的实地观测结果^[15,23]表明, 从早期到晚期喷发强度和能量逐渐减小的火山喷发, 其对周围地区造成的火山灾害会较严重, 遭受火山灾害破坏的空间范围也较大, 因为这种火山喷发开始形成的火山碎屑流和熔岩流流速快、能量大, 能够摧毁火山周围许多设施和建筑物(例如1980年美国的Mt. St. Helens火山喷发^[15]), 同时使后来喷出的、能量相对较小的火山碎屑流和熔岩流也能够沿着原来岩浆流动的轨道和方向到达较远的地方。相反, 如果火山喷发强度和能量从早到晚逐渐增加, 由于早期喷出的火山碎屑流和熔岩流流速慢、能量小, 它们会在火山口附近快速冷凝下来, 从而会阻碍后来喷出的火山碎屑流和熔岩流向更远的地区流动, 因此, 这种火山活动造成的火山灾害相对较小。由于天池火山历史时期大喷发的每个旋回早期喷发能量较大, 演化到晚期火山喷发能量逐渐减小(图2), 所以, 它曾经对周围环境的影响和造成的火山灾害均较严重, 并且导致火山灾害的空间范围也较大。

4.3 天池火山历史时期大喷发对环境的影响

总体上, 天池火山历史时期大喷发喷出的气体以卤化物成分为主, 但是, 至每个旋回晚期喷出的火山硫化物气体有增加的趋势(图2)。近年来, 国外火山气候学的大量研究成果^[11,15,23]证实, 以喷出卤化物气体为主的火山喷发对周围环境的影响主要体现在

如下两个时间尺度不同的方面: (1) 从较短期的环境效应看, 火山喷出的HF气体会吸附在火山灰(尘)表面, 形成剧毒的HF气体云, 在大气圈中迅速扩散, 当沉降地表后会污染火山附近的植被和水质, 导致吃过这些植物的动物窒息、甚至大批死亡。例如, 1783~1784年冰岛Laki火山喷出了大量HF气体, 弥漫在冰岛上空, 污染了岛上及附近地区的植被和水质, 导致所有吃过当地青草的羊群死于氟中毒^[15]。据史料记载, Laki火山这次喷发杀死了岛上75%的牲畜, 也使冰岛人口总量减少24%^[23]。(2) 从中长期的环境效应来看, 火山喷出的HCl气体会造成大气圈臭氧层的破坏, 甚至形成“臭氧洞”, 严重破坏环境和生态平衡, 最终使地表动植物因受到过量太阳紫外线辐射而损坏、直至大批死亡^[15,24]。研究显示, 1991年菲律宾Pinatubo火山喷发至平流层的大量HCl气体及其气溶胶是造成1992年秋季南极上空臭氧洞面积骤然增加的主要原因^[24]。另外, 以往研究表明, 火山喷出的硫化物气体对周围环境和生物生存的主要影响是导致火山附近地区地表温度大幅度下降^[15,22,23]、形成酸雨和剧毒的火山灰云幕, 它们对动物(包括人)的皮肤、眼睛和呼吸系统、水循环、植被及其土地肥力均会造成严重的损坏, 严重时还能导致周围动物窒息而大批死亡^[25]。例如, 最近英国一项研究^[26]表明, 100年来英国市民因为肺癌而大批死亡的年份与全球高硫化物气体大规模火山喷发的年份之间呈现正相关关系。我们将天池火山历史时期大喷发的火山气体含量与世界上几次大规模、爆发性并且曾导致灾难性环境破坏的火山喷发气体含量进行对比(表2)发现, 天池火山喷出气体的含量高于世界上这些大规模火山喷出气体的含量, 并且天池火山喷发物的总量很大^[1,3,10,12], 即天池火山历史时期大喷发进入大气圈的火山气体总量较大, 说明天池火山喷出的气体曾经对周围环境造成过严重的影响。因此可以认为, 天池火山历史时期大喷发每个喷发旋回早期喷出的、HF含量较高的大量火山气体会造成周围地区的动物窒息、甚至大批集群死亡(图2); 每个旋回晚期喷出的大量火山硫化物气体可以形成大规模酸雨和剧毒的火山灰云幕, 它们对周围的动植物生长会造成严重影响。天池历史时期大喷发的另一个较长期的环境

效应是它喷出的大量 HCl 气体会导致大气圈臭氧层减薄、甚至破坏臭氧层。

4.4 对长白山天池火山未来喷发的灾害预测

以往研究表明,长白山天池火山是一座具潜在喷发危险的火山^[3,10]。如果天池火山将来发生喷发活动,那么它喷发的规模会有多大?天池火山将来的喷发对居住在其周围的城乡居民的生命财产、建筑设施以及自然环境有何影响?这些一直是我国火山研究者所关注的焦点和需要进一步解决的科学问题。国外对活火山的实地监测、深部岩浆房探测和火山喷发物的岩石地球化学研究结果^[15,21,23,27]均表明,由深部高温玄武质熔浆的周期性注入浅部岩浆房底部诱发/造成的火山喷发往往会在时间上呈现旋回式的喷发特征。本文的研究显示,天池火山历史时期两个旋回的喷发都是由于下部岩浆房受到深部高温玄武岩浆注入引起的,由此,我们可以推断,天池火山未来的喷发可能会是历史时期旋回式火山喷发的延续,即下一个喷发旋回的开始。以往研究表明,对由于玄武质岩浆注入岩浆房造成的火山喷发,如果两期(或旋回)喷发活动间隔的时间越长,那么在第一期火山喷发后岩浆房上部酸性熔浆聚集的时间就越长,酸性熔浆聚集量相对会越大,预示着第二期(或旋回)的火山喷发将会以富硅的酸性熔浆为主^[27],其喷发能量和造成的火山灾害也会越大。对分布于中朝两国境内的天池火山喷发物野外观察表明,本文所研究的天池火山历史时期两个旋回的喷发物之间不存在风化剥蚀面,说明这两个喷发旋回之间的时间间隔较短,但是它对周围环境的破坏(详见前述)和造成的火山灾害却很严重^[8,10]。相比而言,尽管不同研究者获得的这次大喷发的年龄有差异(见前述),但是绝大多数火山学者认为天池火山历史时期大喷发距今已有约 1000 年的时间,在此期间本区没有发生过大规模酸性熔浆的喷发活动,说明下部岩浆房内酸性熔浆聚集的时间比天池火山历史时期的两个旋回火山喷发之间的时间间隔要长,因此,我们有理由认为,如果天池火山未来喷发的岩浆成分以高硅酸性熔浆为主,那么它喷发的规模、对环境的影响以及造成的火山灾害可能会比本文研究的历史时期大喷发还要

大。如此大规模的火山喷发,可以导致天池的湖水大量迅猛涌出,造成水灾;同时高温熔岩流会对长白山区大面积森林造成严重破坏,甚至引发森林火灾。这一推论给我们目前正在进行的天池火山监测研究和火山灾害防御工作提供了重要启示:天池火山未来的喷发很可能还是以火山喷发早期爆发能量很高,火山喷发晚期能量较小,呈现出从早到晚火山喷发能量逐渐减小的特点;并且天池火山未来喷发造成的自然灾害将很严重,对周围环境的影响也将很严重。

5 结论

长白山天池火山历史时期大喷发由两个喷发旋回组成,每个旋回从喷发早期到晚期,火山喷出的卤化物气体含量逐渐减小,而硫化物气体含量却逐渐增加。在每个火山旋回喷发开始时,火山喷发强度和喷发能量较高,随着火山喷发的进行,喷发强度和喷发能量呈逐渐减小的趋势。天池火山历史时期大喷发是由于岩浆房底部周期性的高温玄武质熔浆注入所致。天池火山历史时期大喷发每个喷发旋回早期喷出的大量 HF 气体会造成周围地区的动物窒息、甚至大批集群死亡;晚期喷出的火山硫化物气体会形成大规模酸雨和剧毒的火山灰云幕,它们对周围的动植物生长也造成了灾难性影响。天池火山历史时期大喷发另一个较长期的环境效应是它喷出的大量 HCl 气体造成大气圈臭氧层减薄、甚至可能破坏臭氧层。天池火山未来喷发的潜在自然灾害和对周围环境的影响都将很严重。

致谢 在朝鲜野外考察期间曾经得到朝鲜国家地震局火山研究所金恒明、成君浩教授、金海男和吴成日先生的大力支持与帮助。曾与本文作者先后一起赴朝鲜进行野外考察的有翟明国、金昌柱研究员和王锡魁教授。在中国一侧对长白山火山区的野外地质考察曾得到刘祥教授的热情帮助。样品的实验室测试工作得到了英国 Leeds 大学 M. Wilson 教授的指导。在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 刘若新. 火山作用与人类环境. 北京: 地震出版社, 1995. 1~13
- 2 刘若新, 仇士华, 蔡莲珍, 等. 长白山天池火山最近一次大喷发年代研究及其意义. 中国科学, D 辑, 1997, 27(5): 437~441

- 3 刘嘉麒. 中国火山. 北京: 科学出版社, 1999. 1~219
- 4 Machida H, Arai F. Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large late Quaternary eruptions. *J Volcanol Geothermal Res*, 1983, 18: 151~164[DOI]
- 5 Machida H, Moriaki H, Zhao D C. The recent major eruption of Changbai volcano and its environmental effects. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 1990, 25: 1~20
- 6 Gill J, Dunlap C, McCurry M. Large-volume, mid-latitude, Cl-rich volcanic eruption during 600~1000 AD, Baitoushan, China, Climate, Volcanism and Global Change. *American Geophysical Union Chapman Conference (March 23-27), Hilo, Hawaii, USA*, 1992, 1~10
- 7 Zielinski G, Mayewski P, Meeker L, et al. Record of volcanism since 7000B.C. from the GISP2 Greenland ice core and implications for the volcano-climate system. *Science*, 1994, 264: 948~952
- 8 刘 祥, 向天元. 中国东北地区新生代火山和火山碎屑堆积物资源与灾害. 长春: 吉林大学出版社, 1997. 1~161
- 9 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等. 长白山天池火山全新世喷发与岩石地球化学特征. *地质论评*, 1999, 45(增刊): 263~271
- 10 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 等. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社, 1998. 1~159
- 11 Horn S, Schmincke H-U. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bull Volcanol*, 2000, 61: 537~555
- 12 郭正府, 刘嘉麒, 隋淑珍, 等. 白头山火山公元 1199/1200 年喷发的火山气体总量估算及其意义. *中国科学, D 辑*, 2001, 31(8): 668~675[摘要] [PDF]
- 13 崔钟燮, 金东淳, 李 霓. 长白山天池火山公元 1199~1200 年大喷发历史记载的发现及其意义. *岩石学报*, 2000, 16(2): 191~193
- 14 Fisher R V, Schmincke H-U. *Pyroclastic Rocks*. Heidelberg: Springer-Verlag, 1984. 1~110
- 15 Sigurdsson H. *Encyclopedia of Volcanoes*. New York: Academic Press, 2000. 1~1384
- 16 Self S, King A J. Petrology and sulfur and chlorine emissions of the 1963 eruption of Gungung Agung, Bali, Indonesia. *Bull Volcanol*, 1996, 58: 263~285[DOI]
- 17 Harm E, Schmincke H-U. Volatile composition of the phonolitic Laacher See magma (12, 900yr BP): implication for syn-eruptive degassing of S, F, Cl and H₂O. *Contrib Mineral Petrol*, 2000, 138: 84~98
- 18 Devine J D, Sigurdsson H, Davies A N, et al. Estimates of sulfur and chlorine yield to the atmosphere from volcanic eruptions and potential climatic effects. *J Geophys Res*, 1984, 89 (B): 6309~6325
- 19 Pallister J S, Hoblitt R P, Reyes A G. A basalt trigger for the 1991 eruptions of Pinatubo volcano? *Nature*, 1992, 356: 426~428 [DOI]
- 20 Webster J D, Raia F, Vivo B D, et al. The behavior of chlorine and sulfur during differentiation of the Mt. Somma-Vesuvius magmatic system. *Mineralogy and Petrology*, 2001, 73: 177~200[DOI]
- 21 Zimbelman J R, Gregg K P. *Environmental Effects on Volcanic Eruptions*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2000. 1~260
- 22 郭正府, 刘嘉麒, 贺怀宇, 等. 火山喷出气体的环境、灾害效应及对火山未来喷发的指示意义. *地震地质*, 2003, 25(增刊): 88~98
- 23 Firth C R, McGuire W J. *Volcanoes in the Quaternary*. London: Geological Society of London, 1999. 1~232
- 24 Brasseur G, Granier C. Mount Pinatubo aerosols, chlorofluorocarbons and ozone depletion. *Science*, 1992, 257: 1239~1242
- 25 Schmincke H-U. *Volcanism*. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 1~29
- 26 Oppenheimer C, Pyle D M, Barclay J. *Volcanic Degassing*. London: Geological Society of London, Special Publications, 2003. 1~347
- 27 Leonard G S, Cole J W, Nairn I A, et al. Basalt triggering of the c. AD 1305 Kaharoa rhyolite eruption, Tarawera Volcanic Complex, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 115: 461~486[DOI]