火山射气岩浆喷发研究新进展

孙 谦, 樊祺诚, 李 霓

中国地震局 地质研究所, 北京 100029

摘 要: 射气岩浆喷发是一种特殊类型的火山活动, 水在这类火山活动中起着至关重要的作用, 其喷发产物——低平火山口和基浪堆积物在中国乃至全世界都很常见。国际上对射气岩浆喷发的研究始于 1921 年。本文在前人研究基础上, 以中国南方北部湾周边第四纪火山区大量射气岩浆喷发成因的低平火山口和基浪堆积物为研究对象, 综合了近几年中国学者的研究成果, 深入讨论了基浪堆积物的地质特征、射气岩浆喷发形成的基本条件、喷发过程的动力学机制, 以及基浪流的搬运过程等重要问题, 提出有待解决的难点, 揭示了这类火山活动的特有属性。

关 键 词: 射气岩浆喷发; 低平火山口; 基浪堆积物; 动力学机制

中图分类号: P317 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2007)04-0323-04

New Advances of the Research on Volcanic Phreatomagmatic Eruption

SUN Qian, FAN Qi-cheng, LI Ni

Institute of Geology, China Earthquake Bureau, Beijing 100029, China

Abstract: The phreatomagmatic eruption is an important and special type of volcanism in which water has played key role. It is characterized with water-related explosive eruption and subsequent base surge deposit and maar lakes both in China and in the rest of world. The research on the phreatomagmatic eruption started in 1921, with over 80 years. On the basis of previous researches, this paper has systematically discussed several important issues regarding the geological features, transportation and sedimentation model of the base surge deposit, the origin and basic condition for causing phreatomagmatic eruption, and dynamic mechanism of the phreatomagmatic eruption process, proposed some problems to be solved, and pointed out some special properties of this type of volcanism.

Key words: phreatomagmatic eruption; maar; base surge; dynamic mechanism

射气岩浆喷发(phreatomagmatic eruption)是一种特殊类型的火山活动, 虽然有别于我们熟悉的溢流式和爆破式喷发, 在中国和全球范围内却甚为常见。

国际上对射气岩浆喷发的研究始于 1921 年, 在研究德国西部 Eifel 第四纪火山区圆形小火山口湖时, 称其为“maar”, 遂译为“玛珥湖”^[1], 表示一种新的火山类型——低平火山口。“基浪”一词最初见于 1947 年南太平洋 Bikini Atoll 的水下热核试验爆炸^[2]; 而作为火山现象的基浪, 见于 1965 年菲律宾塔尔湖(Taal)底火山喷发^[3]。随后, 基浪现象及其堆积物, 日本、北美一些小火山口周围相继发现火山基浪堆积物, 欧洲、新西兰、印尼和韩国等火山口的

喷发物中, 也发现过基浪堆积物^[4]。

中国境内分布着相当数量的射气岩浆喷发成因的低平火山口和基浪堆积物, 主要集中在东北龙岗、北部湾地区的雷南-琼北及广西涠洲岛等第四纪火山区。其中龙岗火山群中分布着 8 个射气岩浆喷发成因的低平火山口已蓄水, 当地称龙湾, 火口垣主要由基浪堆积物组成^[5], 还有不蓄水的旱龙湾。华南沿海的雷州半岛和琼北地区保留有大量射气岩浆喷发成因的低平火山口和基浪堆积物^[1,6,7]。广西涠洲岛和斜阳岛是典型的岩浆与射气交替喷发形成的火山岛, 射气成因的基浪堆积物和火山碎屑相互叠置, 几乎覆盖全岛。此外, 黑龙江镜泊湖火山区和内蒙古阿尔山火山区均见有低平火山口和基浪堆积物

收稿日期: 2007-06-11 收到, 07-03 改回

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40402010); 地震科学联合基金资助项目(106046)

第一作者简介: 孙谦(1969-), 男, 副研究员, 主要从事新生代火山岩石学和喷发动力学方面研究。E-mail: qiansunstr@sina.com

的分布。

所谓射气岩浆喷发就是火山活动时, 炽热的岩浆上升过程中遇到水(主要是含水沉积物中的水体)发生爆炸, 巨大的向上冲击力造成上覆地层的挠曲、破裂、坍塌等一系列过程, 形成大小不等的近似圆形的低平火山口(maar)及基浪堆积物(base surge)。其中岩浆和水共同扮演重要的角色。许多学者通过火山地质学、岩石学、沉积学、物理火山学及数值模拟等多种手段, 进行了野外观测描述和成因机制等多方面的研究^[1, 4, 5, 7~13], 积累了丰富的资料。

1 地质特征

发生射气岩浆喷发时, 基浪云(流)从火山喷发柱横向放射状向外扩散, 特别是那些正在上升的岩浆柱同沉积物中水体接触的地方, 这种现象更为明显^[5, 7]。这种火山基浪是含有大量水蒸汽、火山灰、火山砾等的喷发柱从侧面掠过造成的。凝结的水蒸汽作为火山基浪的一部分, 与火山基浪流中的火山碎屑颗粒成分混合, 并支撑和稀释了基浪中的火山碎屑^[5]。

射气岩浆喷发的典型产物是低平火山口和基浪堆积物。前者的特点是呈圆形或近似圆形, 但有的蓄水成湖(如吉林龙岗龙湾和雷南湖光岩), 有的则不蓄水(如琼北的众多低平火山口)。其规模和保存完好程度大相径庭, 琼北的低平火山口有的保存完好, 有的破坏严重, 残缺不全, 只能依稀看到“残垣断壁”, 但通过追索尚能大致恢复其原貌; 火口大者直径可达2000 m以上, 小者不足100 m^[13]。

基浪流本身是湍流, 也称“火山碎屑密度流”, 随着能量减弱逐渐衰减成普通的沉积重力流^[14]。火山灰级颗粒和一定量级的增生火山砾夹在湍流中以悬浮形式运移, 也依赖于剪应力和沉积速率的平衡, 最终在牵引流的作用下以基底载荷的形式被搬运^[12], 最终堆积下来的基浪堆积物具有大型低角度板状层理或交错层理、波状层理, 形成似沙丘构造, 它们明显具有纹层结构, 纹层的峰顶是向基浪的下游方向迁移。此类基浪堆积物的堆积序列相对复杂, 具有多旋回性, 韵律特征十分明显^[15]。在离开喷发中心一定距离的区域, 常见到射气成因基浪堆积物的指相物质——增生火山砾。增生火山砾的外形近圆形, 直径约2~5 mm, 圈层构造发育, 由大小不等的同心圆球组成, 圈层可逐层剥离。形成这种圈层构造的原因是蒸汽爆炸炸出的细小碎屑物在基

浪流的携带下向远离火口的方向运动, 在此期间碎屑物表面粘结了细粒火山灰和尘土等, 并在滚动过程中形成圆形圈层^[7]。基浪堆积物的另一个重要特征是具爬升层理, 基浪流沿火口内壁向外爬升, 其迎流面坡度陡, 而背流面较为平缓, 有明显的转折端。一般情况下, 当基浪堆积物沿地形障碍爬升到一定高度, 产状将趋平缓, 这是射气岩浆喷发的典型特征, 这一现象可帮助我们确定某些保存不完整的低平火山口的喷发中心的位置, 也是区别一般水下沉积物的重要标志。

值得注意的是, 中国许多第四纪玄武质火山区常常交替出现岩浆喷发和射气岩浆喷发, 较完整的剖面多由基浪堆积物、细粒火山灰火山角砾、集块岩及火山弹等组成, 显示了火山活动的复杂性。

2 动力学机制问题

发生射气岩浆喷发时, 岩浆与含水沉积物在一定条件下相互作用引起水热爆炸, 冲破上覆地层, 形成低平火山口和基浪堆积物。因此, 对其力学机制的探讨主要关心爆破冲击力和上覆地层应力状态两个最基本的参数; 针对中国琼北地区为数众多的射气岩浆喷发成因的低平火山口, 也运用弹性力学基本原理建立了简单的喷发模型^[13]。

由于低平火山口均近似圆形, 故模拟过程将射气岩浆喷发所冲破的上覆地层近似地看作为圆形的弹性薄板, 因而可以采用弹性薄板的原理研究上覆地层的破坏和塌陷与爆破冲击力之间的关系。计算模型为: 低平火山口的半径为 a , 在 $r \leq r_0$ 且 $r_0 < a$ 的区域中承受爆破所产生的向上的冲击力 I (爆破冲击力), 将 I 视作均匀载荷, r_0 表示岩浆与水接触面的半径。爆破冲击力必须大到足以冲破上覆地层才有可能形成低平火山口。据此推导出爆破冲击力 I 的数学表达式和上覆地层的应力状况。得到应力表达式后, 通过求极大值得到最大应力表达式。据此分析上覆地层中哪个部位的应力最大, 该部位将最先发生破坏, 然后是失稳和垮塌, 形成低平火山口。

依据圆板轴对称弯曲理论建立的模型可概略地确定射气岩浆喷发冲破上覆地层时所产生的爆破冲击力 I , 了解爆炸发生时上覆地层中的应力状况。显然, 这种情况只需讨论模型的 $0 \leq r \leq r_0$ 区域。考虑到上覆地层的重量, 得到最终关于爆破冲击力的数学表达式为^[13]:

$$I = \frac{16Eh^3\omega_1}{3(1-\mu^2)r_0^2r^2\left[\frac{r^2}{r_0^2} + \frac{2(1-\mu)}{1+\mu} \cdot \frac{r_0^2}{a^2} - 8\ln\frac{a}{r_0} - \frac{8}{1+\mu}\right]} + \rho_g\pi a^2h \quad (1)$$

式中, I 为爆破冲击力, E 为杨氏模量, h 为上覆含水沉积层的厚度, μ 为泊松比, a 为低平火山口半径。 $0 \leq r \leq r_0$ 时表明没有爆破冲击力 I 的作用, 区域内上覆地层仅发生弯曲。

根据式(1)计算出爆破冲击力 I 、火口半径 a 、上覆地层厚度 h 、岩浆与水接触面半径 r_0 之间的关系和变化趋势, 当上覆地层的厚度和岩浆与含水沉积物接触面半径为定值时, 低平火山口的半径越大, 形成火口时所需的爆破冲击力就越大; 对于同一个火口半径一定的低平火山口而言, 岩浆与含水沉积物

的接触面半径越大, 形成时产生的爆破冲击力就越小; 在给定爆破冲击力和爆炸点(岩浆与含水沉积物接触面)大小的条件下, 低平火口的半径越大, 所对应的爆炸点深度就越深; 在爆破冲击力和低平火口半径确定时, 爆炸点的深度(上覆地层的厚度)随岩浆与地下水接触面半径的增加而减小, 说明大面积岩浆与含水沉积物接触所发生的射气岩浆喷发往往出现在较浅的部位。

经推导得到上覆地层中任意一点的应力状态的方程为:

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_r)_{\max} &= \frac{3Ir_0^2}{8h^2} \left[4(1+\mu)\ln\frac{a}{r_0} + 4 - (1-\mu)\frac{r_0^2}{a^2} - (3+\mu)\frac{r^2}{r_0^2} \right] \\ (\sigma_\theta)_{\max} &= \frac{3Ir_0^2}{8h^2} \left[4(1+\mu)\ln\frac{a}{r_0} + 4 - (1-\mu)\frac{r_0^2}{a^2} - (1+3\mu)\frac{r^2}{r_0^2} \right] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

对式(2)用 VB 语言编程后, 用户只需将上覆地层厚度、低平火山口半径、岩浆与水接触面半径和前面计算得到的爆破冲击力等变量输入, 点击“计算”就可求出上覆地层中各点的最大应力值。

3 基浪流的搬运过程

基浪流是湍流形式的、稀释的火山碎屑物的重力流, 应被看作是具有牛顿流体行为的稀释流体, 可以运用沉积重力流的基本原理来模拟其行为特征^[16]。在基浪流中碎屑颗粒的运动方式主要受控于湍流, 平均运动速率的近似表达式为^[17]:

$$\frac{u}{u^*} = 2.5\ln\frac{y}{k_s} + 8.5. \quad (3)$$

式中, u 是基浪流速率, u^* 是剪切速率, y 是基浪流高度, k_s 为底面不规则度。在知道颗粒沉降速率的情况下就可以得出基浪流的剪切速率, 而颗粒的沉降速率可以表示为^[18]:

$$w = \sqrt{\frac{4g\Phi(\rho_s - \rho_f)}{3C_d\Phi}}. \quad (4)$$

其中, g 是重力加速度, Φ 是碎屑颗粒粒度, $C_d = 0.5$ 为拖拽系数, ρ 为颗粒密度, ρ_f 为流体组分密度, 表达式为^[19]:

$$\rho = (1-C)\rho_a + C\rho_s. \quad (5)$$

其中, ρ_a 是空气的密度, C 是基浪流中颗粒浓度。至此, 获得方程中的全部参数, 用式(4)和(5)可计算出剪切速率 u^* , 将 u^* 代入式(3)中, 得出运移速度随基浪流高度变化的趋势。

模拟的另一项重要内容是反演基浪流中悬浮颗

粒的粒度, 粒度方程为^[20]:

$$\Phi = \Phi_0 \left(\frac{y_0}{1-y_0} \right)^{P_n} \int_{y_0}^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^{P_n} dy. \quad (6)$$

式中, Φ 是粒度为 i 的颗粒以悬浮状态出现在基浪流中所占的比例, Φ_0 是在基浪堆积物中粒度为的 i 颗粒所占的比例, y_0 是参考水平面, 即基浪流底部的高程, y 是基浪流内部的高度, P_n 是碎屑颗粒的 Rouse 数, 由关系式 $P_n = w/ku^*$ ^[12] 给出。计算出碎屑颗粒的 Rouse 数 P_n 后, 可以如下方程^[21] 求得基浪流中颗粒的浓度随基浪高度变化的规律:

$$S = S_0 \left(\frac{y_0}{1-y_0} \frac{1-y}{y} \right)^{P_n}. \quad (7)$$

式中, S 是基浪中任意高度的颗粒浓度, S_0 是基浪流底部的颗粒浓度, 方程中的其它参数同前所述。利用式(7)可以很方便地计算出颗粒浓度 S 随基浪高度 y 的变化规律, 并由此得到基浪流中的浓度剖面^[13]。

参考文献 (References):

[1] 刘嘉麒, Negendank J F W, 王文远, 储国强, Mingram J, 郭正府, 骆祥君, 陈锐, 刘东生. 中国玛珥湖的时空分布与地质特征[J]. 第四纪研究, 2000, 20(1): 78-86.
Liu Jiaqi, Negendan J F W, Wang Wenyuan, Chu Guoqiang, Mingram J, Guo Zhengfu, Luo Xiangjun, Chen Rui, Liu Tungsheng. The distribution and geological character of maar lakes in China[J]. Quaternary Science, 2000, 20(1): 78-86. (in Chinese with English abstract)

[2] Crowe B M, Fisher R V. Sedimentary structures in base-surge deposits with special reference to cross-bedding, U behrbe Cra-

- ters, Death Valley, California [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1973, 84: 663– 682.
- [3] Moore J G, Nakamura K, Alcaraz A. The 1965 eruption of Tall Volcano [J]. *Science*, 1966, 151: 955– 960
- [4] Sohn Y K, Chough S K. The Udo tuff cone, Cheju Island, South Korea: transformation of pyroclastic fall into debris fall and grain fall on a steep volcanic cone slope [J]. *Sedimentology*, 1993, 40: 769– 786.
- [5] 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 [M]. 长春: 吉林大学出版社, 1997.
Liu Xiang, Xiang Tianyuan. Cenozoic volcanoes and pyroclastic deposits in Northeastern China [M]. Changchun: Publishing House of Jilin University, 1997. (in Chinese)
- [6] 黄镇国, 蔡福祥, 韩中元, 陈俊鸿, 宗永强, 林晓东. 雷琼第四纪火山 [M]. 北京: 科学出版社, 1993.
Huang Zhenguo, Cai Fuxiang, Han Zhongyuan, Chen Junhong, Zong Yongqiang, Lin Xiaodong. Quaternary volcanoes in Leizhou Peninsula and North Hainan Island [M]. Beijing: Science Press, 1993. (in Chinese)
- [7] 孙谦, 樊祺诚, 魏海泉, 隋建立, 白志达, 徐德斌, 史兰斌, 张秉良, 洪汉净. 琼北地区晚更新世射气岩浆喷发初步研究 [J]. *地震地质*, 2003, 25(2): 289– 297.
Sun Qian, Fan Qicheng, Wei Haiquan, Sui Jianli, Bai Zhida, Xu Debin, Shi Lanbin, Zhang Bingliang, Hong Hanjing. Preliminary study on Late Pleistocene phreatomagmatic eruptions in North Hainan Island [J]. *Seismology and Geology*, 2003, 25(2): 289– 297. (in Chinese with English abstract)
- [8] Lorenz V. On the growth of maars and diatremes and its relevance to the formation of tuff rings [J]. *Bull. Volcanol.*, 1986, 48: 265– 274.
- [9] Wohletz K H. Water/magma interaction: some theory and experiments on peperite formation [J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2002, 114: 19– 35.
- [10] 杜杨松, 王德滋, 陈克荣. 浙东南沿海中生代火山-侵入杂岩 [M]. 北京: 地质出版社, 1989.
Du Yangsong, Wang Dezi, Chen Kerong. On characteristics, evolution and origin of acidic-intermediate acidic volcanic-intrusive complexes, exemplified by those in the coastal area of southeastern Zhejiang Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1989. (in Chinese)
- [11] Sohn Y K, Chough S K. Depositional processes of the Suwol-bong tuff ring, Cheju Island (Korea) [J]. *Sedimentology*, 1989, 36: 837– 855.
- [12] Dellino P, La Volpe L. Structures and grain size distribution in surge deposits as a tool for modelling the dynamics of dilute pyroclastic density currents at La Fossa di Vulcano (Aeolian Islands, Italy) [J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2000, 96: 57– 78.
- [13] 孙谦, 樊祺诚. 琼北射气岩浆喷发力学机制探讨 [J]. *地震地质*, 2005, 27(1): 63– 72.
Sun Qian, Fan Qicheng. Dynamic mechanism of phreatomagmatic eruption in North Hainan Island [J]. *Seismology and Geology*, 2005, 27(1): 63– 72. (in Chinese with English abstract)
- [14] Fisher R V. Transport and deposition of a pyroclastic surge across an area of high relief: the 18 May 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington [J]. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 1990, 102: 1038– 1054.
- [15] 徐德兵, 白志达, 张秉良, 洪汉净. 吉林龙岗火山群碎屑层浪堆积特征与成因机理 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 60– 66.
Xu Debing, Bai Zhida, Zhang Bingliang, Hong Hanjing. Characteristic and genetic mechanism of pyroclastic base-surge deposits of volcanic swarm in Longgang area, Jilin Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 60– 66. (in Chinese with English abstract)
- [16] Sohn Y K. On traction-carpet sedimentation [J]. *J. Sediment. Petrol.*, 1997, 67(3): 502– 509.
- [17] Middleton G V, Southard J B. Mechanics of Sediment Movement [J]. *Soc. Econ. Paleont. Mineral.*, Tulsa, OK, 1984: 401.
- [18] Le Roux J P. Settling velocity of spheres: a new approach [J]. *Sediment. Geol.*, 1992, 81: 11– 16.
- [19] Lajoie J, Boudon G, Bourdier J L. Depositional mechanics of the 1902 pyroclastic nu e ardente deposits of My. Pele, Martinique [J]. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1989, 38: 131– 142.
- [20] Middleton G V. Hydraulic interpretation of sand size distributions [J]. *J. Geol.*, 1976, 84: 405– 426.
- [21] Valentine G. Stratified flow in pyroclastic surge [J]. *Bull. Volcanol.*, 1987, 49: 616– 630.