

长白山天池火山碎屑流灾害区划¹

王新茹¹⁾ 赵波²⁾ 万园²⁾ 魏费翔²⁾

1) 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871

2) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

摘要 在回顾总结了国外火山碎屑流灾害分析模型研究历史的基础上, 本文选取了 Flow3D 模型对我国东北地区长白山天池火山未来大喷发可能产生的火山碎屑流进行了灾害区域划分。以长白山天池火山现代地形为依据, 设定了 11 条未来爆炸式火山喷发时产生的火山碎屑流的可能流动线路。模拟结果表明, 在喷发柱高度为 10km 的情况下, 灾害区划最大半径为 13.7km; 在喷发柱高度为 20km 的情况下, 灾害区划最大半径为 35.4km; 在喷发柱高度为 30km 的情况下, 灾害区划最大半径为 57.8km。在此基础上, 得出了长白山天池火山未来发生中规模、大规模和超大规模火山喷发时火山碎屑流的覆盖范围, 完成了我国第一幅长白山天池火山碎屑流灾害区划图。

关键词: 长白山天池火山 火山碎屑流 灾害区划

引言

长白山天池火山是我国境内保存最为完整的新生代多成因复合火山, 位于吉林东部的中国—朝鲜边境上 (北纬 41°20′—42°40′, 东经 127°00′—129°00′), 处于长白山山脉的最高峰, 属于大型的复式火山。全新世以来, 天池火山的喷发在时间上初步可分为四期: 5000 年前、公元 946 年 (千年大喷发)、公元 1668 年和 1702 年。喷发时均以爆破式火山喷发为主, 产生了大面积的空降浮岩堆积、火山碎屑流、火山泥石流和熔岩流 (于红梅等, 2007; 2011; 赵波等, 2010; 赵波, 2011; Xu 等, 2013; Wei 等, 2013; Yu 等, 2013; Zhao 等, 2013)。天池火山的每个活动阶段几乎都有不同规模的火山碎屑流产生, 其中以千年大喷发形成的火山碎屑流规模最大, 影响范围达 2160km²。火山碎屑流具有以下灾害特征: ①在成分上主要为火山碎屑物 (浮岩碎屑、岩屑和晶屑等) 与气体的混合; ②流速快 (高达 200m/s), 可攀爬高达 1000m 的障碍物; ③温度高, 最高可大于 900℃; ④搬运距离远, 能量大, 大规模的可达 50—100km。鉴于上述特点使得火山碎屑流具有极强的致灾性。

在国外早期的火山碎屑流灾害研究中, Malin 等 (1982) 开发了 Energycone 程序用于模拟 1980 年圣海伦斯火山爆发。为了弥补 Energy Cone (energy line) 模型中性线流体翻越地形障碍

1 基金项目 地震行业专项 (201208005) 与 (200708-27) 共同资助

【收稿日期】 2014-11-14

【作者简介】 王新茹, 女, 生于 1977 年。讲师。主要从事教育管理、GIS 应用等研究。E-mail: xinruwang@pku.edu.cn

【通讯作者】 赵波, 男, 生于 1983 年。助理研究员。主要从事火山地质、火山灾害等研究。E-mail: zhaobo@ies.ac.cn

物的不足, Sheridan 等 (1992; 1995) 开发了 Flow2D; 随后 Flow3D 等模拟模型相继发展起来 (Kover, 1995)。2002 年美国纽约州立大学布法罗分校、国家地理信息和分析中心、纽约州工程设计和工业创新中心参与了一项为期 3 年的山地物质流研究项目, 该项目的研究领域涉及数学模型、地质模拟和地理信息科学, 并研制出了 Titan2D 模型 (Sheridan 等, 2004; 余斌, 2005)。

实际上在国外的研究中主要分为两步: 早期是单纯的火山碎屑流灾害分布研究, 如基于 GIS 的 Energycone 模型, 研究用于人员分散和应急救援; 随着研究的不断深入, 逐渐变成为基于物理模型的数学研究即科学问题, 如 Titan2D 和 PDAC (Todesco 等, 2002) 需要采用快速的数学运算来研究流体复杂的运动过程。而未来的趋势是将上述两方面的研究综合起来, 将大量的数据转化为三维可视化图形, 使普通人都可以参与火山碎屑流灾害的应急响应之中。

国内火山碎屑流研究起步较晚, 研究程度相对薄弱。“九五”期间吉林省地震局在长白山地区灾害区划图的编制与减灾对策的子专题的实施过程中, 把长白山地区火山碎屑流分为重灾区和中等灾害区 (杨清福, 2005)。整个重灾区以天池火山口为中心, 半径在 40—60km 范围。在这个区域内将会发生冲撞、掩埋、高温灼烧等破坏, 造成建筑物、桥梁等基础设施毁灭性破坏, 在此地区的人员存活几率较小。火山碎屑流中等灾区是指火山碎屑流派生的灰云浪部分, 以湍流搬运为主, 堆积物具有交错层理, 影响范围为 75—90km。以上灾害划分均是针对超大规模的火山碎屑流, 尽管不够详细, 但的确是长白山天池火山碎屑流灾害区划的雏形和基础。

近年来的相关研究成果表明, 半经验的 Flow3D 模型模拟的结果与实际分布吻合较好 (Todesco 等, 2002; Sheridan 等, 2004; Saucedo 等, 2005), 因此, 本文采用了基于 Flow3D 模型原理的分段网格计算方法, 对长白山天池火山未来大喷发可能产生的火山碎屑流进行了灾害区划研究。

1 碎屑流灾害模型

1.1 Flow3D 物理模型

Flow3D 模型是基于库仑阻力的滑块模型, 该模型通过构建一个不规则三角网格或 TIN 法的 3D 数字高程模型来计算滑块速度的变化。模型通常是记录块体的轨迹沿着很小的时间增量直到停止, 每一时间步长的块体的速度和位置被记录下来 (图 1)。由于长白山天池火山

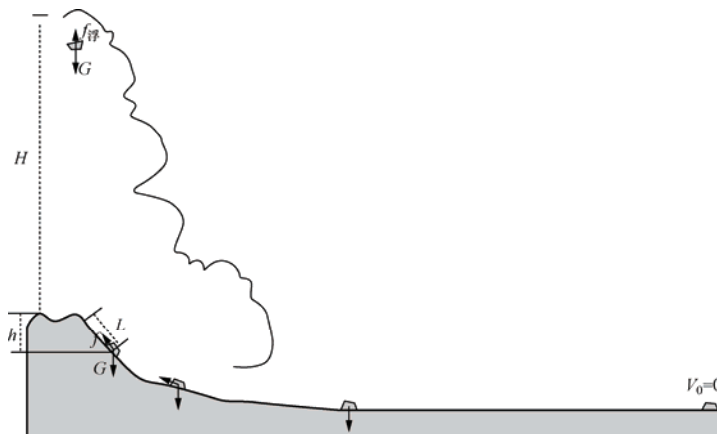


图 1 Flow3D 滑块模型示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch showing movement of sliding particles in pyroclastic flow

地区三角网格计算复杂, 极易进入死循环, 因此, 本文对滑块模型进行了修改, 在长白山天池火山千年大喷发地质调查的基础上, 结合 Energycone 模型和滑块模型两种模型, 对火山碎屑流喷发和流动过程进行优化, 把计算路线分为若干段, 根据数学模型分别赋予参数、计算移动距离、模拟火山碎屑流流动范围。

1.2 数学模型

Flow3D 数学模型主要包含能量守恒方程和阻力计算方程两部分。其中能量守恒方程属性原理如下:

$$mgH - \frac{\rho_{\text{空气}} gmH}{\rho_{\text{碎屑}}} = 0.5mv_0^2$$

$$mgh + 0.5mv_0^2 = F_1l_1 + \dots + F_nl_n + 0.5mv_0^2$$

$$\theta_n = \arccos \frac{h_n}{l_n}$$

式中, m 为碎屑质量, 一般看作单位质量; g 为重力加速度; v_0 为初始速度; H 为喷发柱高度; h 为火口与停止面的垂直高度; $\rho_{\text{空气}}$ 为空气密度; $\rho_{\text{碎屑}}$ 为碎屑的密度; θ_n 为某一段的平均坡度; F 为阻力, 其中 $F_1, 2, 3, \dots$ 为某一段的摩擦阻力; V_n 为碎屑某一段的最终速度。

从以上公式中可以看出, 在摩擦力相同的条件下, 决定碎屑搬运距离的主要是喷发柱高度。

而阻力计算方程采用的是 Mellor 的雪崩方程:

$$\tau = a_0 + a_1v + a_2v^2$$

$$a_0 = \mu$$

式中, v 是速度; a_0, a_1, a_2 分别为基本摩擦力、内摩擦力和湍流的阻力系数。根据物理模型, 可将火山碎屑流当作块体, 所以湍流可忽略不计, 这样湍流的阻力 a_1, a_2 为零。

在火山碎屑流模拟中, μ 是一个非常重要的系数, 直接决定着摩擦阻力的大小。天池火山地区的计算路线主要是高山草甸、河谷裸露的岩石和水泥路面等, 摩擦系数可根据地物不同而改变, 下面重点介绍 μ 值的选取。

1.3 计算路线及参数的选取

Flow3D 模型的一个重要基础就是基于 DEM 网络的计算, 通过生成的 tin 网格, 计算不同节点的能量损耗, 确定移动距离。其中 μ 值是在 tin 网格两个节点之间垂直方向位移 H 和实际移动位移 L 的比值, μ 值的选取主要根据地貌的情况确定, 具体如表 1 所示。而本文是通过对 DEM 进行分段化计算, 即简化了 Flow3D 模型的计算过程。

表 1 不同类型岩石地表动摩擦系数 μ 的取值表

Table 1 Friction coefficients of basements with different rock types

物体 1	物体 2	动摩擦系数 μ
水泥块	潮湿的岩石	0.5
水泥块	干燥的岩石	0.6—0.7

根据长白山的地貌特征和所选路线的情况，在锥体附近（海拔大于 1500m）、峡谷底部堆积垮塌的岩石碎块以及气候干冷处， μ 值取 0.7；而在盾体和台地气候湿润、岩石表面多为潮湿处， μ 值取 0.5。

Flow3D 是一维模型，只能沿着给定的路线进行运动。因此在计算路线选取时主要遵循以下两个原则：①近源、中源一般选取峡谷通道；②远源选取平坦低洼地区。同时选择的依据应与地质调查的认识一致，近源、中源峡谷一般为火山碎屑流主要流动通道，而远源一般在低洼处堆积。根据上述原则，笔者按以下步骤对计算路线进行了选取：

- (1) 对长白山地区数字地形图进行大地坐标系校正；
- (2) 在 3D analyses 中，把长白山数字地形图转化为 tin 格式；
- (3) 把 tin 格式转化为 DEM 图；
- (4) 在 DEM 图上选取计算路线，如图 2 所示；

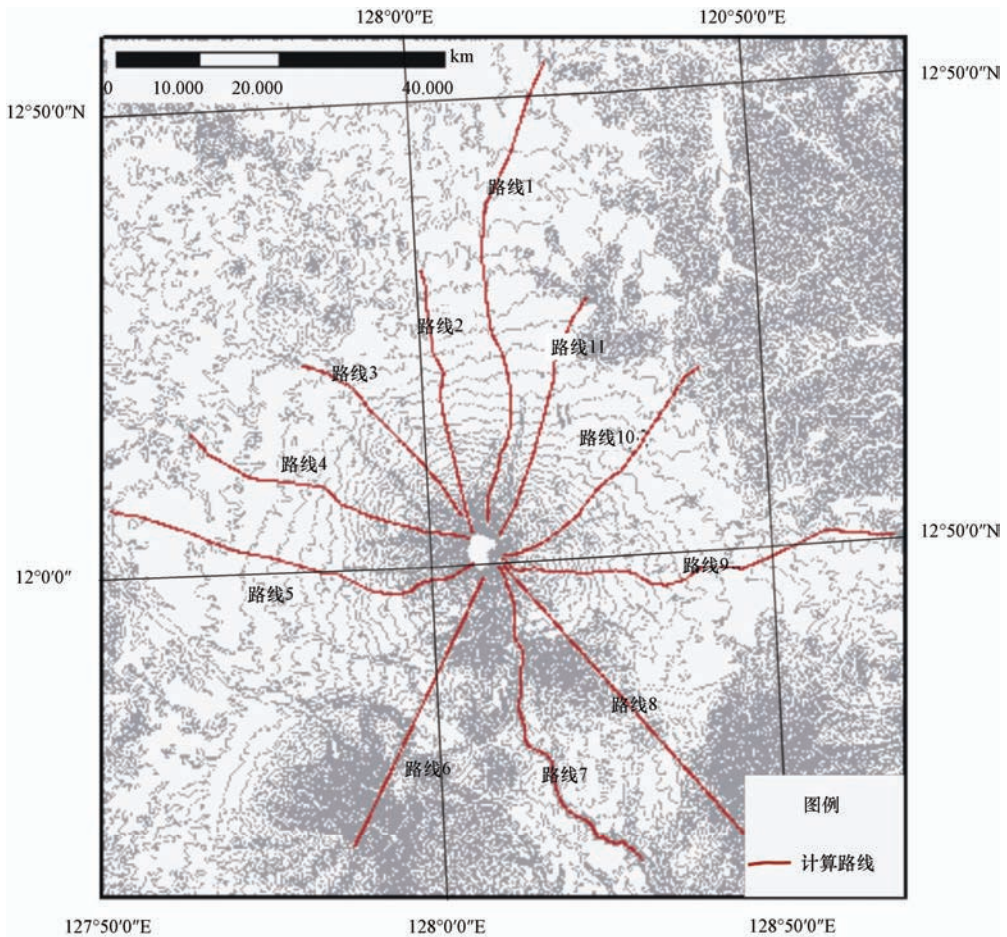


图 2 天池火山潜在火山碎屑流路线图

Fig. 2 Flow paths of potential pyroclastic flows around Tianchi caldera

(5) 根据坡度的不同对计算路线进行分段, 结果如图 3 所示。

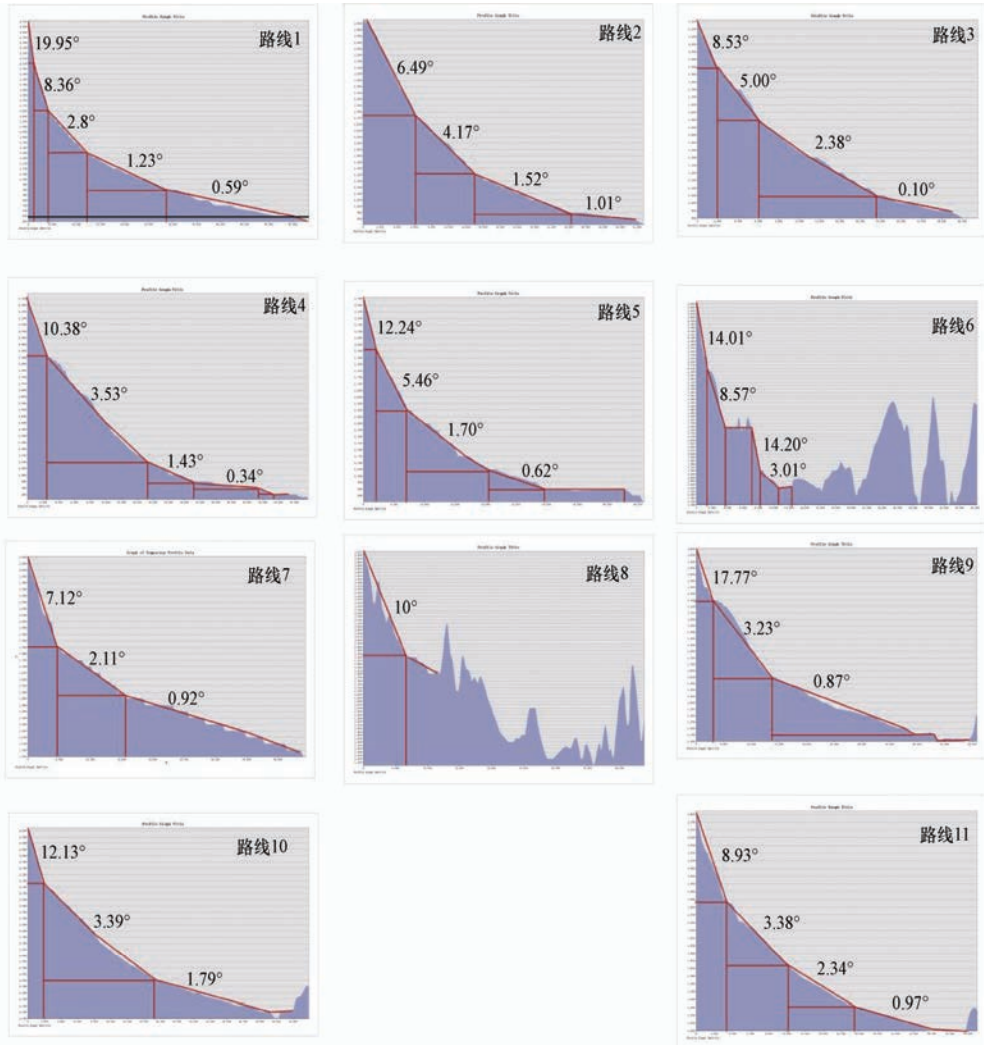


图 3 计算路线及分段示意图

Fig. 3 Cross-sections and segmentation of flow paths

2 天池火山碎屑流灾害区划图

根据上述所选的计算路线和参数, 可计算出在不同喷发规模条件下沿着各线路火山碎屑流的最大流动距离, 计算结果如表 2 所示。

根据地形走势来连接各个喷发规模的流动距离, 由此可形成不同喷发柱高度下火山碎屑流的前缘等值线。对于 10km 高的喷发柱, 在火山碎屑流范围内基本上呈圆形分布, 并以火口为中心半径约 14km, 但是在南坡小白山由于受到高山的阻挡, 在连接时应顺着山角连接; 对于 20km 高的喷发柱, 以火口为中心, 约 36km 为半径分布, 火山碎屑流范围基本上呈圆

形分布，依旧是南坡高山地貌对火山碎屑流分布影响较大，考虑到火山碎屑流具有较强的爬坡能力，在第二个高山坡脚处受到阻挡，所以这种规模的火山碎屑流分布形态类似于千年大喷发火山碎屑流分布；对于 30km 高的喷发柱，以火口为中心，约 60km 为半径分布，考虑到火山碎屑流分布范围广泛并且受地形制约明显，尤其是受到南部和东北部山脉的影响，所以火山碎屑流的前缘连线基本上沿着这些山脉的坡度梯度带分布。

表 2 计算结果表

Table 2 Input parameters and calculating results

滑块质量 (M)	1kg		
碎屑密度 (ρ_s)	790 kg/m ³		
空气密度 (ρ_k)	1.297kg/m ³		
碎屑体积 (V)	0.00126 m ³		
喷发柱高度 (H)	10km	20km	30km
初始流动速度 (v_0)	447m/s	632 m/s	774 m/s
路线 1 流动距离	13.7km	35.4km	57.8km
路线 2 流动距离	12.7 km	32.5km	—
路线 3 流动距离	13.1km	—	—
路线 4 流动距离	12.2km	31.8km	—
路线 5 流动距离	12.8km	32.9km	54.6km
路线 6 流动距离	12.4km	—	—
路线 7 流动距离	13.1km	34.6km	—
路线 8 流动距离	10.1km	—	—
路线 9 流动距离	12.6km	32.7km	50.3km
路线 10 流动距离	13.5km	34.9km	—
路线 11 流动距离	13.6km	35.3km	—
流动最大距离	13.7km	35.4km	57.8km

在完成上述工作的基础上，以天池火山千年大喷发火山碎屑流分布格局为参考并根据天池火山周边地区的地貌特征，笔者编制了天池火山火山碎屑流不同规模喷发的灾害区划图，如图 4 所示。从图中可以看出：以天池火山为中心，在喷发柱高度为 10km 的情况下，灾害区划最大半径为 13.7km；在喷发柱高度为 20km 的情况下，灾害区划最大半径为 35.4km；在喷发柱高度为 30km 的情况下，灾害区划最大半径为 57.8km。

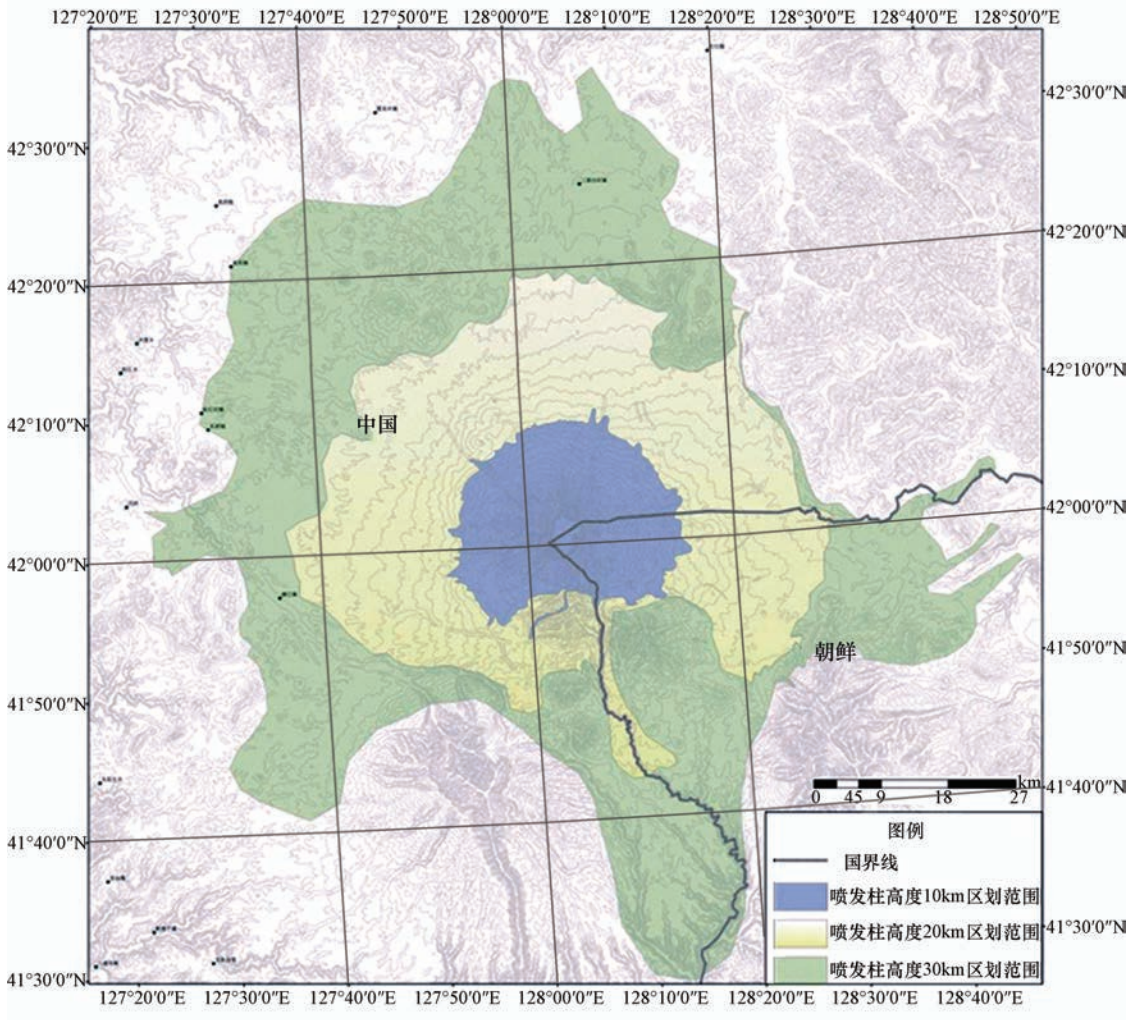


图 4 长白山天池火山火山碎屑流灾害区划图

Fig. 4 Pyroclastic flow hazard map of Changbaishan Tianchi volcano

3 结论与讨论

本文设定 10km、20km、30km 喷发柱高度来代表天池火山不同规模的爆发，并使用国际上通用的一维滑块模型进行路径计算，同时以地貌为参考把各个路线的前缘点连接起来，从而完成了国内第一幅具有预测含义的火山碎屑流灾害区划图。与天池火山千年大喷发火山碎屑流分布范围图及前人所做的天池火山火山碎屑流历史灾害区划图相比较，本研究中技术路线的选择基本以峡谷和河谷为主，火山碎屑流主流动单元主要沿峡谷流动，远源部分堆积于低洼，这与野外调查结果基本一致。此外，前人研究成果认为天池火山千年大喷发火山喷发柱高度在 25—30km 之间（魏海泉等，2004），天池火山 40km 范围内为火山碎屑流重点防护区（刘若新等，1998）。而在本文编制的长白山天池火山火山碎屑流灾害区划图中，在喷发柱高度为 20km 的情况下，灾害区划最大半径为

35.42km, 这与前人的结果非常接近, 也间接地反映出本次灾害区划模型中所选取的参数具有一定的合理性。

参考文献

- 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 1998. 长白山天池火山近代喷发. 北京: 科学出版社, 1—15.
- 魏海泉, 金伯禄, 刘永顺, 2004. 长白山天池火山地质学研究的若干进展与灾害分析. 岩石矿物学杂志, **23** (4): 305—312.
- 杨清福, 2005. 长白山天池火山碎屑流分布图报告. 吉林省地震局.
- 余斌, 2005. 美国纽约州立大学布法罗分校火山碎屑流和泥石流数学模型研究近况. 山地学报, **23** (1): 126—128.
- 于红梅, 许建东, 赵谊, 2007. 长白山天池火山千年大喷发空降碎屑物的数值模拟. 地震地质, **29**(3): 522—534.
- 于红梅, 许建东, 林传勇, 2011. 长白山天池火山千年大喷发空降浮岩碎屑的形貌特征分析和最终沉降速度. 地震地质, **33** (2): 440—451.
- 赵波, 许建东, 于红梅, 2010. 长白山地区火山碎屑粒度特征研究. 地震地质, **32** (2): 233—242.
- 赵波, 2011. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流相模式及灾害区划研究. 国际地震动态, **389**: 44—46.
- Kover T.P., 1995. Application of a digital terrain model for the modeling of volcanic flows: a tool for volcanic hazard determination. MA thesis, University at Buffalo, Buffalo, New York.
- Malin M.C., Sheridan M.F., 1982. Computer-assisted mapping of pyroclastic surges. Science, **217**: 637—639.
- Saucedo R., Macias J.L., Sheridan M.F., Bursik M.I., Komorowski J.C., 2005. Modeling of pyroclastic flows of Colima Volcano, Mexico: implications for hazard assessment. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **139**: 103—115.
- Sheridan M.F., Macías J.L., 1992. PC software for 2-dimensional gravity-driven flows: Application to Colima and El Chichón Volcanoes, México. Second International Meeting on Volcanology, Colima, México, 5.
- Sheridan M.F., Macías J.L., 1995. Estimation of risk probability for gravity-driven pyroclastic flows at Volcán Colima, México. Journal of Volcanology and Geothermal Research, **66**: 251—256.
- Sheridan M.F., Hubbard B. et al., 2004. Pyroclastic Flow Hazard at Volcán Citlaltépetl. Natural Hazards, **33**: 209—221.
- Todesco M., Neri A., Esposti Ongaro T. et al., 2002. Pyroclastic flow hazard assessment at Vesuvius (Italy) by using numerical modeling. I. Large-scale dynamics. Bulletin of Volcanology, **64**: 155—177.
- Wei H.Q., Liu G.M., Gill J., 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: implications for possible future eruptions. Bulletin of Volcanology, **75**, doi: 10.1007/s00445-013-0706-5.
- Xu J., Pan B., Liu T., Hajdas I., Zhao B., Yu H., Liu R. and Zhao P., 2013. Climatic impact of the millennium eruption of Changbaishan volcano in China: New insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating. Geophys. Res. Lett., **40**: 54—59. doi: 10.1029/2012GL054246.
- Yu H., Xu J., Luan P., Zhao B., Pan B., 2013. Probabilistic assessment of tephra fallout hazard at Changbaishan volcano, Northeast China. Natural Hazards, **69**: 1369—1388, doi: 10.1007/s11069-013-0683-1.
- Zhao B., Xu J., Lin C., 2013. Study of Distal Pyroclastic-flow Stratum from Tianchi Volcano in 1215 (± 15) Eruption: Pyroclastic-flow Over Water: ACTA GEOLOGICA SINICA (English Edition). **87** (1): 801—809.

Pyroclastic Flow Hazard Zonation of Changbaishan Tianchi Volcano

Wang Xinru¹⁾, Zhao Bo²⁾, Wan Yuan²⁾ and Wei Feixiang²⁾

1) College of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China

2) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

Abstract In this paper we reviewed the recent development of mathematical models in pyroclastic flow hazard assessment, and chose Flow3D model as the tool to simulate the coverage area of pyroclastic flow deposits from eruption of Changbaishan Tianchi volcano. The farthest distances along 11 flow paths that the pyroclastic flow may reach under three eruption scales are calculated with the model. Finally, pyroclastic hazard map of Changbaishan Tianchi volcano is generated, which shows the potentially covered areas by pyroclastic flow deposits from potential eruptions with three eruption scales, i.e. medium, large and super scales with eruption column heights of 10km, 20km and 30km respectively.

Key words: Changbaishan Tianchi volcano; Pyroclastic flow; Hazard map