

长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积相特征^{*}

衣健^{1,2} 王璞珺^{1,2} 单玄龙^{1,2**} CARNIEL Roberto³ 武成智⁴ 王寒非⁵ 孙松^{1,2} 郭剑南^{1,2}
 Yi Jian^{1,2}, WANG PuJun^{1,2}, SHAN XuanLong^{1,2**}, CARNIEL Roberto³, WU ChenZhi⁴, WANG HanFei⁵, SUN Song^{1,2} and GUO JianNan^{1,2}

1. 吉林大学, 东北亚生物演化与环境教育部重点实验室, 长春 130026
2. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061
3. Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, University of Udine, Udine 33100
4. 长白山天池火山监测站, 安图 133613
5. Department of Geological Sciences, University of Canterbury, Christchurch 4800

1. Key Laboratory for Evolution of Past Life and Environment in Northeast Asia, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130026, China
2. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China
3. Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, University of Udine, Udine, Friuli 33100, Italy
4. Changbai Mountain Tianchi Volcano Observatory, Antu 133613, China
5. Department of Geological Sciences, University of Canterbury, Christchurch, Private Bag 4800, New Zealand

2020-03-02 收稿, 2020-07-10 改回.

Yi J, Wang PJ, Shan XL, Carniel R, Wu CZ, Wang HF, Sun S and Guo JN. 2020. Facies variations in the pyroclastic density currents (PDCs) produced by the Millennium Eruption of the Changbaishan Tianchi volcano, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 36(11):3346–3362, doi:10.18654/1000-0569/2020.11.06

Abstract The Plinian Millennium Eruption (ME) of the Changbaishan Tianchi volcano in 946 AD generated a total tephra volume of 100 ~ 172 km³ produced by a large scale of ME-I eruption and a small scale of ME-II eruption. This study examines the facies variations in the pyroclastic density currents (PDCs) emplacements that were produced by the ME based on observations of the depositional units, vertical sequences in 53 outcrops. Grain-size and composition analysis using standard dry sieving techniques and microscope observations of thin sections in the laboratory provided detailed information for the PDCs emplacement. The ME PDCs deposits of the Changbaishan Tianchi volcano can be divided into two facies: canyon filling PDCs facies and fan-shaped PDCs facies. The canyon filling PDCs facies are mainly developed in the circumference area of the volcanic cone (8 ~ 23 km from the crater and slope between 15° to 60°) which are mainly restricted by the volcanic valleys, and can further be divided into massive canyon filling and layer canyon filling sub-facies. In contrast, fan-shaped PDCs facies are mainly distributed in the areas between 23 ~ 45 km from the crater which present relatively gentle slope between 5° to 15°. In this area, the fan-shaped PDCs were not restricted by the topography and generally formed fan-shaped emplacements with a large aspect ratio. Fan-shaped PDCs can also be divided into fan head and fan body sub-facies. The vertical stacked multiple PDCs units occurred in both layer canyon filling and fan head sub-facies, which can be attributed to the separation and proliferation of flow units in the process of PDCs transport. According to the maximum distribution range and the thickness of the ME PDCs, in case of another Plinian eruption like ME, the area within at least 45 km from the eruption center has a huge risk of PDCs disaster. This study is helpful to understand the spatial distribution of the PDCs emplacement in the Changbaishan Tianchi volcano, in order to mitigate the potential disastrous consequences of a future similar volcanic eruption.

Key words Changbaishan Tianchi volcano; Millennium Eruption; Pyroclastic density currents; Facies variation; Future volcanic disaster

摘要 发生于公元 946 年的长白山天池火山千年大喷发 (Millennium Eruption, ME) 形成的火山碎屑流堆积物体积高达 100

* 本文受国家自然科学基金重大项目 (41790453)、国家自然科学基金面上项目 (41972313)、吉林省科技发展计划主题引导项目 (20170101001JC) 和吉林大学地热资源开发技术与装备教育部工程研究中心联合资助。

第一作者简介: 衣健, 男, 1984 年生, 博士, 讲师, 矿产普查与勘探专业, E-mail: yijian@jlu.edu.cn

** 通讯作者: 单玄龙, 男, 1969 年生, 博士, 教授, 矿产普查与勘探专业, E-mail: shanxl@jlu.edu.cn

~172km³, 并可分为大规模的 ME-I 和小规模的 ME-II 两个喷发阶段。通过对围绕长白山天池火山 53 个典型露头剖面进行火山地质测量(单元构成、垂向堆积序列和堆积特征), 结合筛析法粒度分析、偏光显微镜成分分析, 刻画了长白山千年大喷发火山碎屑流堆积物特征, 探讨了相和亚相划分, 并建立了火山碎屑流搬运和堆积模式。根据火山碎屑的堆积特征, 将长白山千年大喷发火山碎屑流堆积分为峡谷充填火山碎屑流相(包括块状峡谷充填亚相和层状峡谷充填亚相)和火山碎屑流冲击扇相(包括扇头亚相和扇体亚相)等两相四亚相。峡谷充填火山碎屑流相主要发育在天池火山锥体周缘距离喷发中心 8~23km 左右范围内(坡度在 15°~60°之间)的火山 U 型谷中; 火山碎屑流冲击扇相主要发育在距离喷发中心 23~45km 左右范围内, 地形相对平缓的熔岩台地处(坡度在 5°~15°之间), 火山碎屑流的搬运不受地形限制, 一般形成较大纵横比扇状堆积。块状峡谷充填亚相和扇体亚相以块状混杂堆积为主要特征, 而层状峡谷充填亚相和扇头亚相则以多火山碎屑流单元垂向叠加为主要特征。多单元叠加现象是由搬运过程中火山碎屑流单元发生分离增生作用形成。根据火山碎屑流的最大分布范围和厚度, 如果再次发生与长白山千年大喷发类似规模的普林尼式喷发, 至少距长白山天池火山喷发中心 45km 范围内具有巨大的火山碎屑流灾害风险。该研究有利于进一步深入认识长白山千年大喷发火山碎屑流堆积物的空间分布特征和相变规律, 对火山碎屑流喷发灾害的预防具有指导作用。

关键词 长白山天池火山; 千年大喷发; 火山碎屑流堆积; 相模式; 火山灾害

中图分类号 P317

长白山天池火山位于中朝边界, 是我国最大的一座具有潜在喷发危险的活火山(图 1)(刘嘉麒和王松山, 1982; Wei *et al.*, 2013)。约一千年前长白山天池火山发生了一次规模巨大的 VEI-7 级普林尼式火山喷发, 即长白山千年大喷发(Yin *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013), 这次喷发普遍被认为是全球 2000 年来最大的喷发事件之一(Horn and Schmincke, 2000)。长白山千年大喷发火山碎屑喷发体积高达 100~172km³, 形成了围绕长白山天池火山锥体分布, 面积达数千平方千米的火山碎屑堆积体(Machida and Arai 1983; Horn and Schmincke 2000; Guo *et al.* 2002)。根据长白山天池火山喷发的旋回性和周期性规律以及长期的火山地震、温泉和形变监测结果, 长白山天池火山未来具有再次发生大规模爆炸式喷发的危险性(Stone, 2010, 2011; Xu *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2013)。如果长白山天池火山未来再次发生类似规模的普林尼式喷发, 将会形成巨大的火山灾害(杨清福和薄景山, 2007; Xu *et al.*, 2012)。充分认识灾害发生的地质规律是预防和减轻地质灾害的关键。对长白山千年大喷发火山碎屑堆积特征进行详细研究, 深入认识其搬运-堆积过程和机制, 对制定火山灾害应急预案, 防灾减灾具有重要作用。

目前, 对长白山天池火山千年大喷发的研究, 主要集中在千年大喷发的喷发时间(尹金辉等, 2005; Yin *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013; Yang *et al.*, 2014; Zou *et al.*, 2014)、喷发序列(金伯录和张希友, 1994; 刘祥和向天元, 1997; Wei *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2017)、喷发物理参数(Machida and Arai, 1983; Guo *et al.*, 2002)、火山碎屑物岩石学特征、岩浆来源和演化(李霓等, 2004; 隋建立等, 2007; Tang *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2015)和火山气体(Horn and Schmincke, 2000; Guo *et al.*, 2002; 李霓等, 2008; Yu *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2014a)等方面。而对长白山千年大喷发火山碎屑堆积物相模式的研究相对较少。目前已经取得的相关成果主要包括长白山千年大喷发火山碎屑喷发物空

(刘祥和向天元, 1997)和对这三种类型火山碎屑堆积物粒度、成分和序列特征的描述(刘祥等, 2000; 杨清福等, 2007; 赵波等, 2010)。对长白山千年大喷发火山碎屑堆积物从喷发中心到远火山口的空间相变特征和相应的搬运堆积过程还缺乏深入的认识。

本次研究主要针对长白山千年大喷发普林尼式喷发柱垮塌形成的火山碎屑流堆积物, 开展系统性的粒度、成分和堆积序列研究。以此为基础, 明确长白山千年大喷发火山碎屑流堆积物的相、亚相构成, 建立从近火山口到远火山口的火山碎屑流堆积相变模式。进而根据堆积序列的空间变化, 分析火山碎屑流的搬运和堆积过程。

1 地质背景

长白山天池火山位于欧亚大陆东缘, 中朝克拉通板块北部, 由太平洋板块向欧亚大陆东缘俯冲形成, 是我国最大的层火山(刘嘉麒和王松山, 1982; Dostal *et al.*, 1988; Hetland *et al.*, 2004; Zhao and Liu, 2010; Wei *et al.*, 2013; Kern *et al.*, 2016)。其火山活动始于上新世, 并一直持续到二十世纪(刘嘉麒, 1987; 刘若新等, 1992)。长白山天池火山喷发可大体分为三个主要的喷发旋回, 包括: 玄武岩造盾旋回(5.02~1.05Ma)、粗安岩-粗面岩造锥旋回(1.17~0.05Ma)和粗面-碱流质浮岩破火山口喷发旋回(0.01Ma~946CE)(Zhang *et al.*, 2018)。破火山口阶段后还存在几次小规模火山喷发作用(1903、1702、1668、1403CE), 这几次小规模喷发也被称为后破火山口阶段(Liu *et al.*, 2015; Machida *et al.*, 1990; Sun *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018)。根据碳化石的同位素测年结果, 长白山千年大喷发发生在 946CE 左右(Xu *et al.*, 2013), 形成了长白山地区分布最为广泛的火山碎屑堆积物(刘祥和向天元, 1997; 尹金辉等, 2005)。

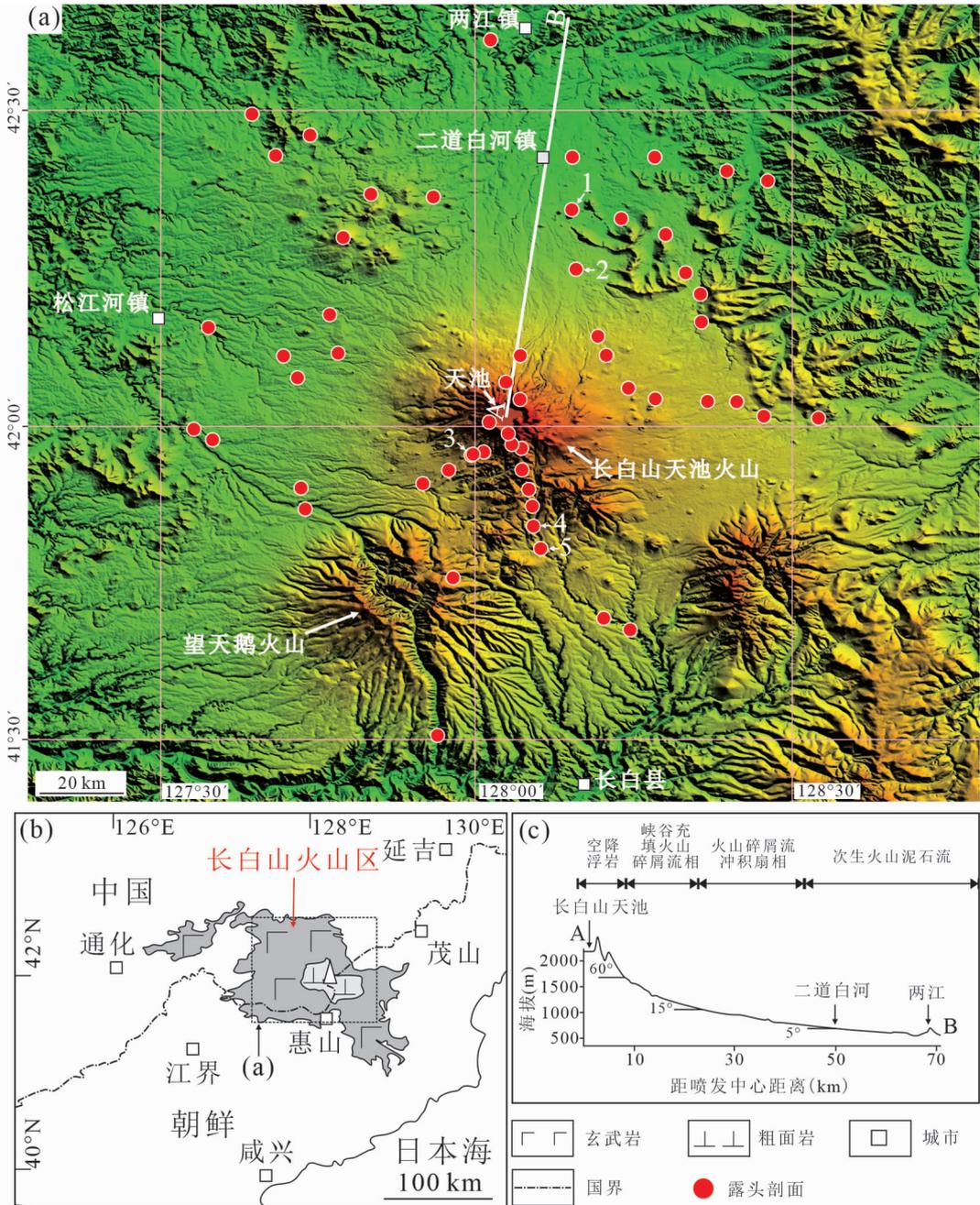


图1 长白山天池火山地理位置

(a)长白山火山区火山锥体分布和露头剖面位置. 图中红点为本次研究涉及的53个露头剖面点, 1~5为后图中的典型剖面位置;(b)长白山火山区地理位置;(c)长白山天池火山地形剖面图

Fig. 1 Location of Changbaishan Tianchi Volcano

(a) map of the Changbaishan volcanic field that shows the location of the Changbaishan Tianchi volcano. The red dots show the 53 outcrops that were measured in this study; No. 1 ~ No. 5 are the typical outcrops used in this paper; (b) overview map that shows the location of the Changbaishan volcanic field; (c) topographic profile A-B (Fig. 1a) from the crater to the distal of the Changbaishan volcano. The different facies areas are indicated

2 样品和实验方法

2.1 露头剖面地质测量

本次研究对围绕长白山天池火山的53个露头剖面开展

了系统性地质测量(图1)。重点刻画了长白山千年大喷发火山碎屑流堆积物的垂向堆积序列、碎屑物粒度、分选和磨圆等特征。

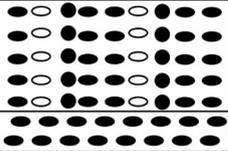
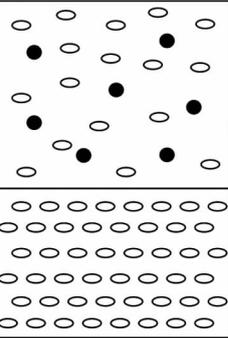
喷发阶段		岩性剖面	^{14}C 年龄	岩性描述
长白山千年大喷发 (Millennium Eruption)	第二阶段 (ME-II)		895±100~ 980±65 AD (尹金辉等, 2005)	火山碎屑流, 含有黑色粗面质浮岩和灰白色碱流质浮岩两种类型浮岩和大量围岩碎屑, 基质为灰黑色火山灰 以空降形成的黑色粗面质浮岩堆积为主
	第一阶段 (ME-I)		969±20 AD (Horn and Schmincke, 2000) 946±3 AD (Xu et al. 2013) 921~941 AD (Yin et al, 2012)	火山碎屑流堆积, 以灰白色碱流质浮岩堆积为主, 基质为灰白色火山灰 以空落形成的灰白色碱流质浮岩堆积为主
				

图2 长白山千年大喷发火山喷发序列简图(据 Machida *et al.*, 1990; Sun *et al.*, 2014b 修改)

Fig.2 Simplified lithological stratigraphy of the ME of the Changbaishan Tianchi volcano (modified after Machida *et al.*, 1990 and Sun *et al.*, 2014b)

2.2 粒度分析

在详细刻画露头剖面火山碎屑堆积序列的基础上, 针对位于序列不同部位的火山碎屑堆积物, 开展系统性粒度分析样品采集(每份粒度分析样品包括火山碎屑物 3~5kg)。将采集的火山碎屑样品, 在实验室进行筛析法粒度分析, 包括: (1) 利用烘干箱对火山碎屑样品进行烘干; (2) 烘干后利用套筛进行筛析法粒度分析, 并对筛选后 $-7 \sim 4\Phi$ (0.063~128mm) 范围内不同粒级的火山碎屑物进行称重, 计算不同粒级区间火山碎屑物的重量百分含量。

2.3 成分分析

在筛析法粒度分析的基础上进行成分分析, 包括: (1) 针对不同粒级的火山碎屑物, 进行岩矿鉴定薄片制作, 而后利用偏光显微镜进行各粒级火山碎屑物成分鉴定; (2) 根据鉴定结果, 对每个粒级火山碎屑物的成分构成进行划分, 确定每个粒级不同成分火山碎屑物的体积分数; (3) 根据每种不同岩性火山岩的平均密度(排水法密度测量获得), 将每个粒级不同成分火山碎屑物的体积分数换算为质量分数, 结合粒度分析结果, 确定火山碎屑物的成分构成。

3 长白山千年大喷发火山喷发序列

Horn and Schmincke (2000)、Pan *et al.* (2017) 等学者将长白山千年大喷发分为两个相对独立的喷发阶段, 即早期喷发阶段(Eruption phase I, ME-I) 和晚期喷发阶段(Eruption phase II, ME-II) (图2)。这两个喷发阶段均为普林尼式喷

发(Yu *et al.*, 2013), 火山碎屑喷发物均以浮岩为主, 并具有相差不大的碳化木同位素年龄(图2) (Horn and Schmincke, 2000; 尹金辉等, 2005; Yin *et al.*, 2012; Xu *et al.*, 2013), 但是在喷发规模、浮岩和火山灰成分上具有显著差异(Horn and Schmincke, 2000)。ME-I 喷发规模较大(Horn and Schmincke, 2000), 其火山碎屑成分包括灰白色浮岩(图3a), 玄武岩、粗安岩、粗面岩、碱流岩岩屑(图3b), 碱性长石晶屑和灰色玻屑(图3c); ME-II 喷发规模稍小(Horn and Schmincke, 2000), 成分包括黑色浮岩(图3d), 岩屑(成分与 ME-I 类似, 图3e), 碱性长石晶屑和棕色玻屑(图3f)。根据化学成分分析, ME-I 和 ME-II 的原生火山碎屑(浮岩和玻屑)成分具有较大的差异。灰白色浮岩和灰色玻屑均为碱流质, 而黑色浮岩和棕色玻屑为粗面质(史兰斌等, 2005; Pan *et al.*, 2017)。尹金辉等(2005)、Yin *et al.* (2012)、Xu *et al.* (2013)、Sun *et al.* (2017) 等学者对破火山口阶段围绕长白山天池火山锥体分布的火山碎屑堆积物进行了详细的碳化木测年和火山碎屑堆积物(浮岩和火山灰)成分对比, 认为天池锥体周缘平坦熔岩台地上大规模的灰白色碱流质浮岩堆积为 ME-I 喷发形成, 而锥体附近火山峡谷中(如鸭绿江大峡谷、锦江大峡谷、浮石林大峡谷、黑石沟沟谷)充填的黑色浮岩为 ME-II 喷发产物。

4 长白山千年大喷发火山碎屑流堆积相类型划分

刘祥和向天元(1997)根据喷发物的搬运和堆积方式, 将长白山千年大喷发火山碎屑堆积物分为空降火山碎屑、火山

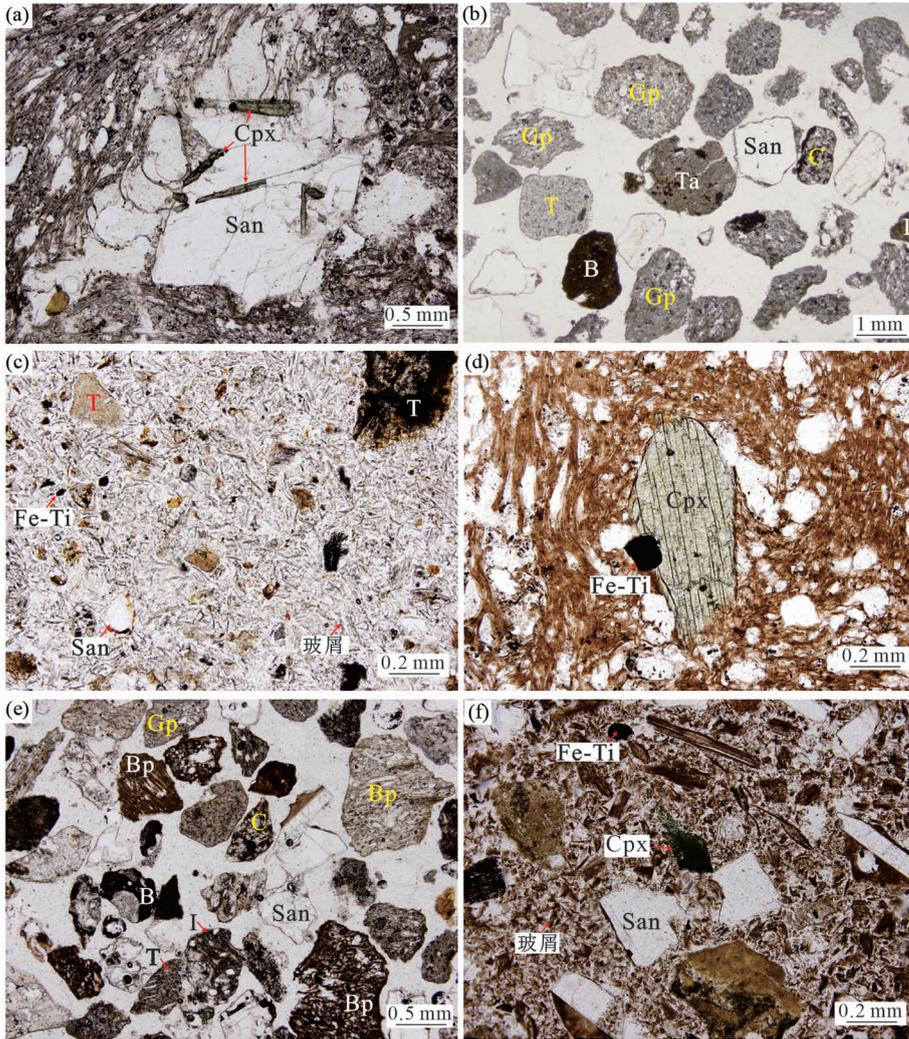


图3 长白山千年大喷发火山碎屑流堆积物典型显微照片

(a) ME-I火山碎屑中灰白色碱流质浮岩;(b) ME-I火山碎屑中1~2mm 粒级碎屑颗粒构成;(c) ME-I火山碎屑中<0.5mm 粒级火山碎屑构成;(d) ME-II火山碎屑中黑色粗面质浮岩;(e) ME-II火山碎屑中1~2mm 粒级碎屑颗粒构成;(f) ME-II火山碎屑中<0.5mm 粒级火山碎屑构成。

Gp-灰白色浮岩;Bp-黑色浮岩;Ta-粗安岩;T-粗面岩;B-玄武岩;C-碱流岩;San-透长石;Cpx-辉石;Fe-Ti-钛铁氧化物;I-熔结凝灰岩

Fig. 3 Microscopic features of the PDCs that were produced by the ME of the Changbaishan volcano

(a) gray comendite pumice lapilli in ME- I pyroclastic deposits; (b) approximately 1-2-mm-diameter ash in ME- I pyroclastic deposits; (c) less than 0.5-mm-diameter ash in ME- I pyroclastic deposits; (d) black trachyte pumice lapilli in ME- II pyroclastic deposits; (e) approximately 1-2-mm-diameter ash in ME- II pyroclastic deposits; (f) less than 0.5-mm-diameter ash in ME- II pyroclastic deposits. Gp-gray pumice; Bp-black pumice; Ta-trachyandesite; T-trachyte; B-basalt; C-comendite; San-sanidine; Cpx-clinopyroxene; Fe-Ti-Iron titanium oxide; I-ignimbrite

碎屑流和火山泥石流三种类型。其中空降火山碎屑和火山碎屑流为原生火山碎屑堆积,火山泥石流为次生火山碎屑堆积。本次研究重点关注长白山千年大喷发原生火山碎屑流堆积的相和亚相构成。

火山碎屑喷发物的空间分布主要受喷发作用、喷发物搬运-堆积动力学过程和火山地形等因素综合控制,从近火山口到远火山口,火山碎屑堆积物类型和特征一般发生规律性变化(Manville *et al.*, 2009; Wang and Chen, 2015)。对于长白山天池火山,根据对其北、西、南坡露头剖面系统性地质考察结果,从近火山口到远火山口,随着火山地形发生急剧变化,千年大喷发火山碎屑流的搬运和堆积作用也发生了较大

的变化:在距离火山喷发中心0~8km左右范围内,由于坡度极为陡峭(坡度多大于60°,图1),火山碎屑流无法大规模堆积,仅存在少量火山碎屑流堆积物,以空降浮岩堆积为主(图4、图5);在距离喷发中心8~23km左右范围内(坡度在15°~60°之间,图1),分布有多条下切U型火山峡谷(吕弼强等, 2005; 魏海泉等, 2005; 栾鹏等, 2009),火山碎屑流易受地形限制在峡谷中搬运和堆积(刘祥和向天元, 1997)。根据野外火山地质考察的结果,千年大喷发火山碎屑流在该区主要充填在这些围绕火山锥体分布的火山峡谷中,如鸭绿江大峡谷、锦江大峡谷、浮石林大峡谷、黑石沟等(图4、图5)(峡谷外的火山碎屑流堆积物则较少,可能由于堆积厚度较

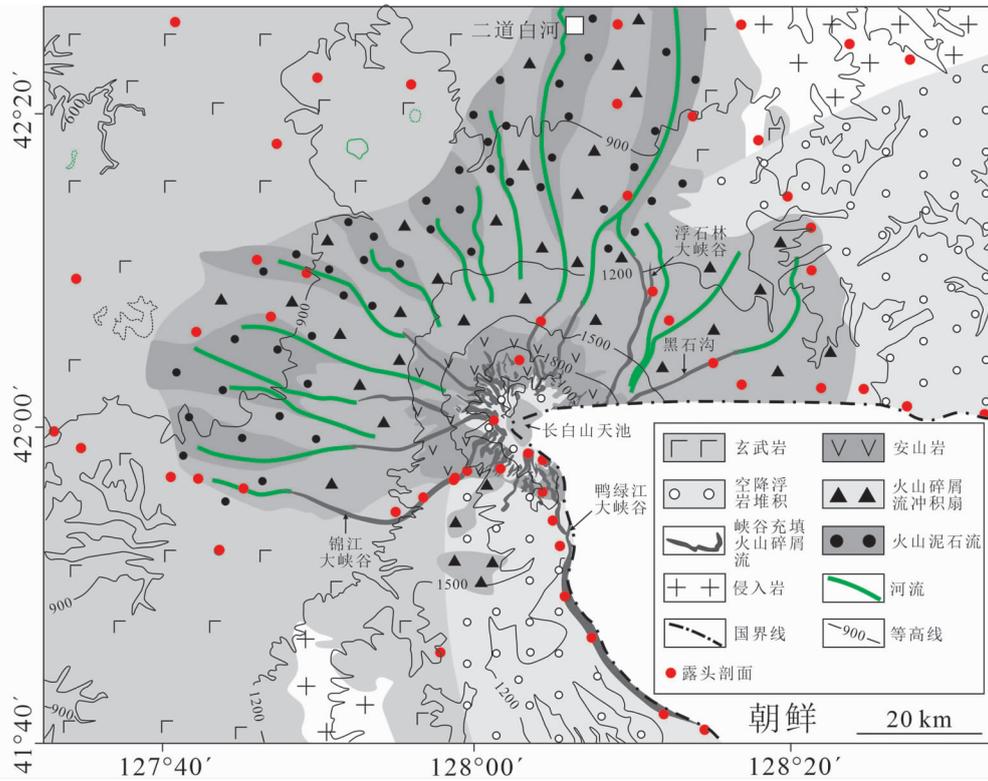


图4 长白山千年大喷发火山碎屑堆积物平面分布特征

该图基于野外露头地质测量,并参考金伯录和张希友, 1994; 刘祥和向天元, 1997; 刘祥等, 2000; 单新建等, 2002; Sun *et al.*, 2017; Pan *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018 编制;图5 同

Fig.4 Distribution of the pyroclastic deposits that were produced by the ME

This figure is based on outcrop measurements and geological research (Jin and Zhang, 1994; Liu and Xiang, 1997; Liu, 2000; Shan *et al.*, 2002; Sun *et al.*, 2017; Pan *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2018), also in Fig.5

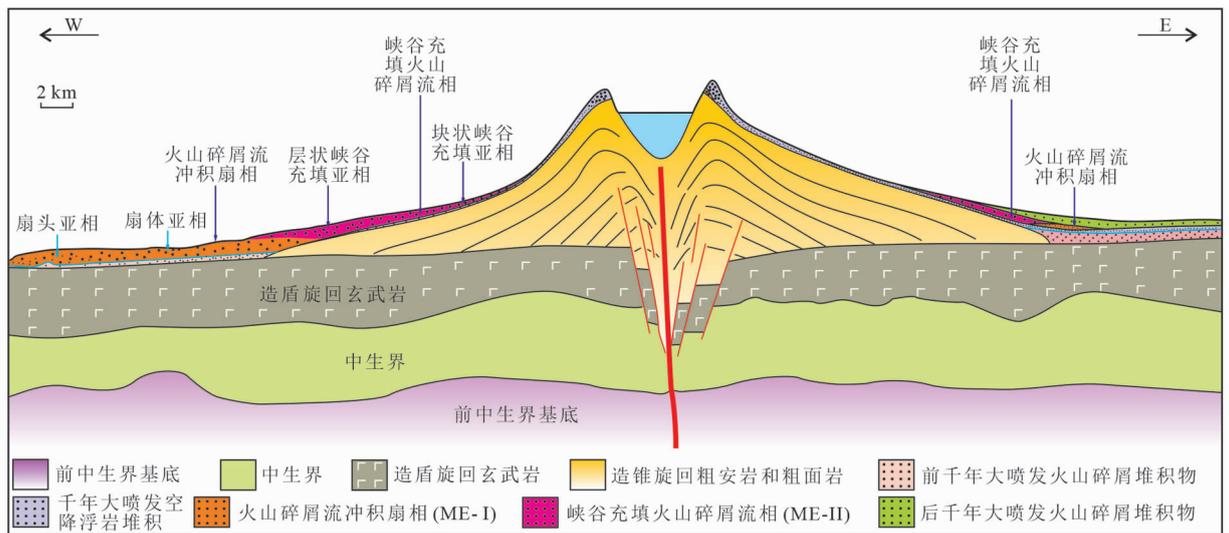


图5 长白山千年大喷发火山碎屑堆积物分布剖面图

Fig.5 Cross section diagram that showing the distribution of the pyroclastic facies that were produced by the ME of the Changbaishan volcano

表 1 长白山千年大喷发火山碎屑流堆积相和亚相划分

Table 1 Classification of the facies and sub-facies of the PDCs emplaces produced by the ME

相	亚相	空间分布	主要地质特征简述	喷发-搬运-堆积过程
峡谷充填火山碎屑流相 (Canyon filling PDCs)	块状峡谷充填亚相 (Massive canyon filling)	距离喷发中心 8 ~ 23km 左右范围内 (坡度在 15° ~ 60° 之间) 的火山 U 型谷中堆积, 多位于峡谷上段	浮岩和岩屑集块、角砾及火山灰混杂堆积, 浮岩有一定磨圆, 基质支撑, 分选差, 各粒级分布较为平均, 块状构造无层理, 熔结程度高的火山碎屑流局部可发育柱状节理	千年大喷发喷发柱垮塌形成的火山碎屑流沿火山 U 型谷搬运并充填峡谷形成。多位于峡谷上段, 由于靠近喷发中心, 火山碎屑流混杂搬运, 不发生火山碎屑流单元分离增生作用, 因此为块状充填, 无层理
	层状峡谷充填亚相 (Layer canyon filling)	火山 U 型谷中堆积, 多位于峡谷下段	浮岩和岩屑集块、角砾及火山灰混杂堆积, 浮岩有一定磨圆, 基质支撑, 分选差, 各粒级分布较为平均; 以厚层平行层理为主要特征	火山碎屑流搬运至峡谷下段后受搬运能量减弱的影响或遇到地形波折, 火山碎屑流单元发生分离增生作用, 多个火山碎屑流单元垂直向堆叠形成厚层平行层理
火山碎屑流冲积扇相 (Fan shaped PDCs)	扇头亚相 (Fan head)	距离喷发中心 23 ~ 45km 左右范围内 (坡度在 5° ~ 15° 之间) 的地形平坦地带堆积, 多位于火山碎屑流扇体头部	浮岩集块、浮岩砾及火山灰混杂堆积, 浮岩有磨圆, 颗粒-基质支撑, 分选差, 粒度分布为粗粒、浮岩和火山灰双峰式, 缺少中间粒级。粗碎屑常由多个堆积单元构成, 单元间可夹多层透镜状火山灰层	火山碎屑流在火山锥体周围地形开阔处形成扇状堆积体。动能最强的粗碎屑集中在扇体前端形成以集块和角砾为主的扇头亚相堆积; 火山碎屑流上部漂浮状态的灰云浪沉降并被夹入分离成多个单元搬运的火山碎屑流中形成火山灰夹层
	扇体亚相 (Fan body)	多位于火山碎屑流扇体中后部	以浮岩砾在火山灰基质中聚集成透镜状为典型特征, 块状构造无层理, 火山灰含量较扇头亚相多	火山碎屑流形成的冲积扇向扇体方向搬运能量减弱, 火山砾含量减少, 灰级颗粒增多

5 千年大喷发火山碎屑流堆积地质特征

基于详细的野外露头剖面火山地质测量和实验室粒度、成分分析结果, 本次研究对长白山千年大喷发两个喷发阶段不同相和亚相的火山碎屑流堆积特征进行了详细刻画 (表 2)。

5.1 峡谷充填火山碎屑流相

长白山千年大喷发第二阶段 (ME-II) 峡谷充填火山碎屑流相较为发育, 广泛分布在长白山火山锥体周缘的火山峡谷中 (图 4)。在峡谷上段多发育块状峡谷充填亚相; 峡谷下段则主要发育层状峡谷充填亚相 (图 5)。这两种亚相厚度均较大, 厚度多在 30 ~ 50m 左右, 横向分布范围受火山峡谷

薄, 被风化土壤层掩盖); 在距离喷发中心 23 ~ 45km 左右范围内, 地形相对平缓 (坡度在 5° ~ 15° 之间, 图 1), 火山碎屑流的搬运不受地形限制, 一般形成较大纵横比扇状堆积 (Vazquez and Ort, 2006) (图 4、图 5)。距喷发中心大于 45km 左右 (坡度 < 5°, 图 1), 未见火山碎屑流露头剖面, 主要为次生火山泥石流堆积区 (Yi *et al.*, 2019) (图 4、图 5)。

由于火山碎屑流在火山峡谷和峡谷外平坦熔岩台地发生了较大的搬运和堆积作用变化, 因此火山碎屑流堆积可划分为两种不同的火山碎屑堆积相, 即峡谷充填火山碎屑流相 (表 1、图 6、图 7) 和火山碎屑流冲积扇相 (表 1、图 8、图 9)。在峡谷充填火山碎屑流和火山碎屑流冲积扇这两种火山碎屑堆积相中, 火山碎屑堆积特征在火山碎屑流堆积体不同部位也具有一定的变化: 如峡谷充填火山碎屑流相在峡谷上段多为块状构造, 无层理 (图 6a、图 7a), 而在峡谷下段多发育厚层平行层理 (图 6c、图 7b); 浮岩冲击扇相从扇体到扇头火山碎屑粒度增大, 由单一单元 (图 8f、图 9b) 变为多单元叠置 (图 8a、图 9a)。因此, 可以根据火山碎屑堆积物在堆积体中所处的不同位置和具有的不同堆积特征进一步划分火山碎屑堆积亚相: (1) 根据具有不同特征的火山碎屑流堆积物在扇状堆积体中所处的位置, 将火山碎屑流冲积扇相划分为扇头和扇体 2 个亚相 (表 1)。(2) 对于峡谷充填火山碎屑流相, 是否发育平行层理, 除了取决于其在峡谷中所处的位置 (如峡谷上段还是峡谷下段), 还受火山碎屑流规模的影响 (后文讨论)。随着火山碎屑流规模的增大, 火山碎屑流单元发生分离增生作用形成平行层理的位置逐渐向峡谷下段迁移 (Vazquez and Ort, 2006)。如果火山碎屑流规模足够大 (如 ME-I 阶段火山碎屑流), 则在峡谷中可能不发育平行层理 (图 6e、图 7c)。因此, 类比火山碎屑流冲击扇相, 按火山碎屑流堆积在峡谷中所处的位置 (如峡谷上段和峡谷下段) 进行亚相划分可能不具有普适性。因此, 本次研究根据关键堆积特征的差异, 即是否具有平行层理进行峡谷充填火山碎屑流相的亚相划分, 即将峡谷充填火山碎屑流相划分为块状峡谷充填亚相和层状峡谷充填亚相等 2 个亚相 (表 1)。

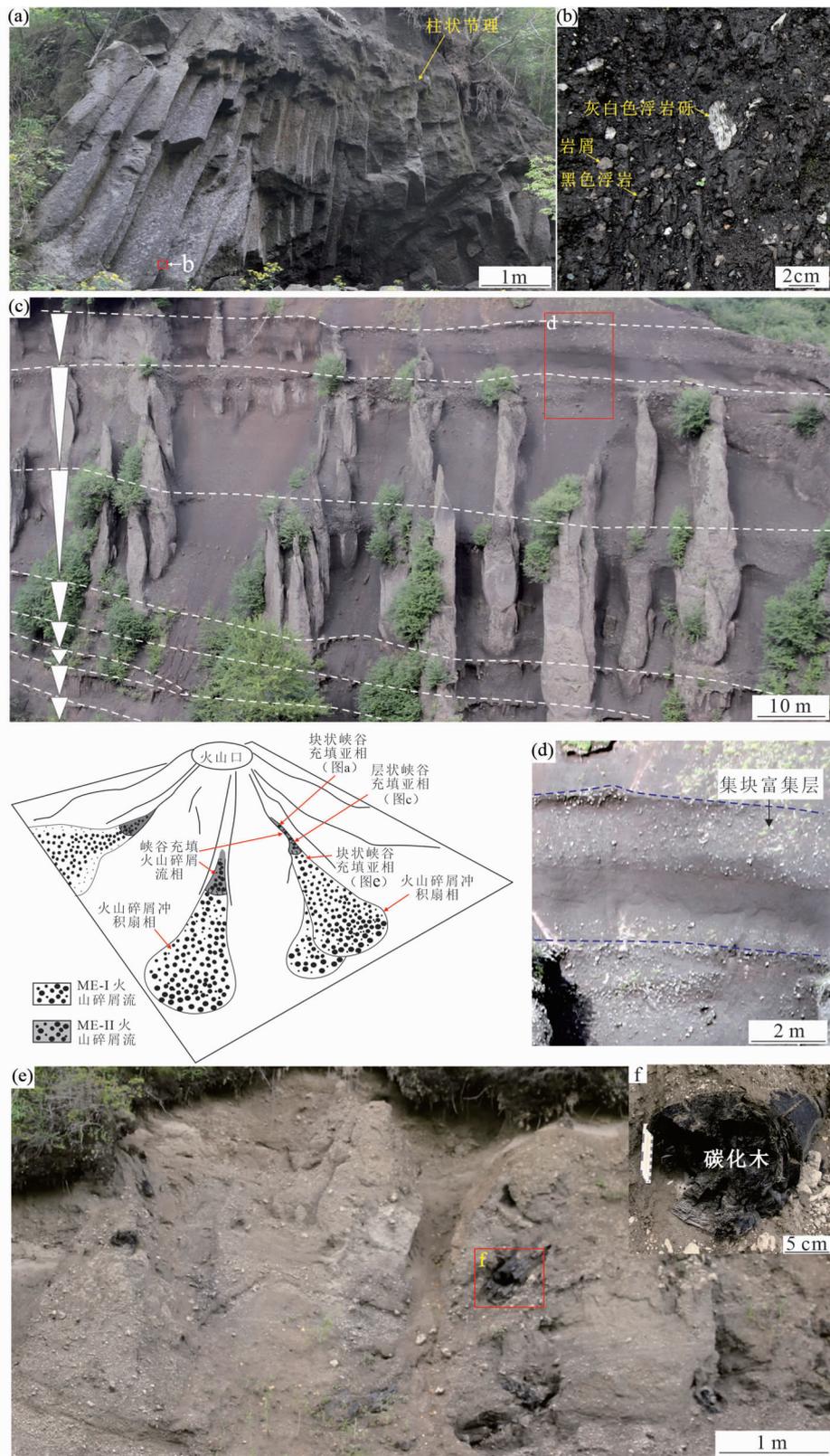


图6 长白山千年大喷发峡谷充填火山碎屑流相典型堆积特征

(a)具有柱状节理的典型 ME-II 块状峡谷充填亚相宏观地质特征;(b)图 a 中火山碎屑构成;(c)具有平行层理的典型 ME-II 层状峡谷充填亚相宏观地质特征;(d)图 c 中逆序层理;(e)典型 ME-I 块状峡谷充填亚相宏观地质特征;(f)图 e 中碳化木。注释:图 a, b 来自图 1a 中 3 号剖面;图 c, d 来自图 1a 中 4 号剖面;图 e, f 来自图 1a 中 5 号剖面

Fig. 6 Representative Canyon filling PDCs produced by the ME

(a) representative massive canyon filling sub-facies with columnar joints produced by ME-II; (b) gray and black pumice lapilli and lithics in Fig. 6a; (c) representative layer canyon filling sub-facies features several sheet-like units produced by ME-II; (d) close-up photo of the reverse-graded bedding in each sheet-like unit in Fig. 6c; (e) representative massive canyon filling sub-facies produced by ME-I; (f) carbonized wood in Fig. 6e

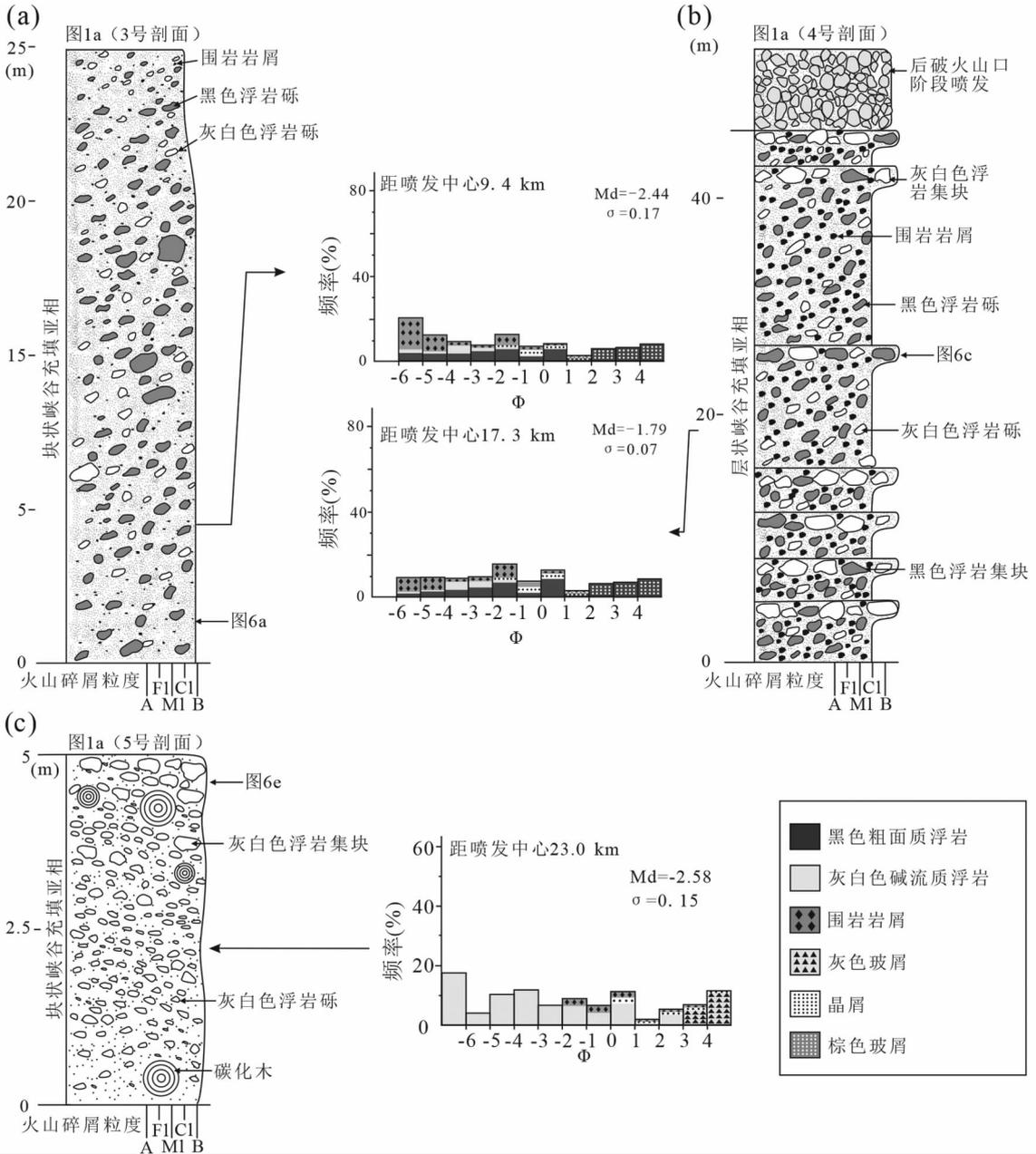


图7 长白山千年大喷发峡谷充填火山碎屑流相典型垂向序列和粒度成分特征

(a) 典型 ME-II 块状峡谷充填亚相垂向堆积序列和火山碎屑粒度-成分频率分布直方图; (b) 典型 ME-II 层状峡谷充填亚相垂向堆积序列和粒度-成分频率分布直方图; (c) 典型 ME-I 块状峡谷充填亚相垂向堆积序列和粒度-成分频率分布直方图. 火山碎屑粒度分级(直径): A-火山灰级 <2mm; F1-细火山砾级 2~4mm; M1-中火山砾级 4~16mm; C1-粗火山砾级 16~64mm; B-火山集块级 >64mm

Fig. 7 Representative vertical sequence and size distribution histograms of the canyon filling PDCs produced by the ME

(a) typical vertical sequence and frequency and componentry histograms of the massive canyon filling sub-facies that were produced during ME-II; (b) typical vertical sequence and frequency and componentry histograms of the layer canyon filling sub-facies that were produced during ME-II; (c) typical vertical sequence and frequency and componentry histograms of the massive canyon filling sub-facies that were produced during ME-I. Grain size (diameter): A-ash <2mm; F1-fine lapilli 2~4mm; M1-medium lapilli 4~16mm; C1-coarse lapilli 16~64mm; B-block >64mm

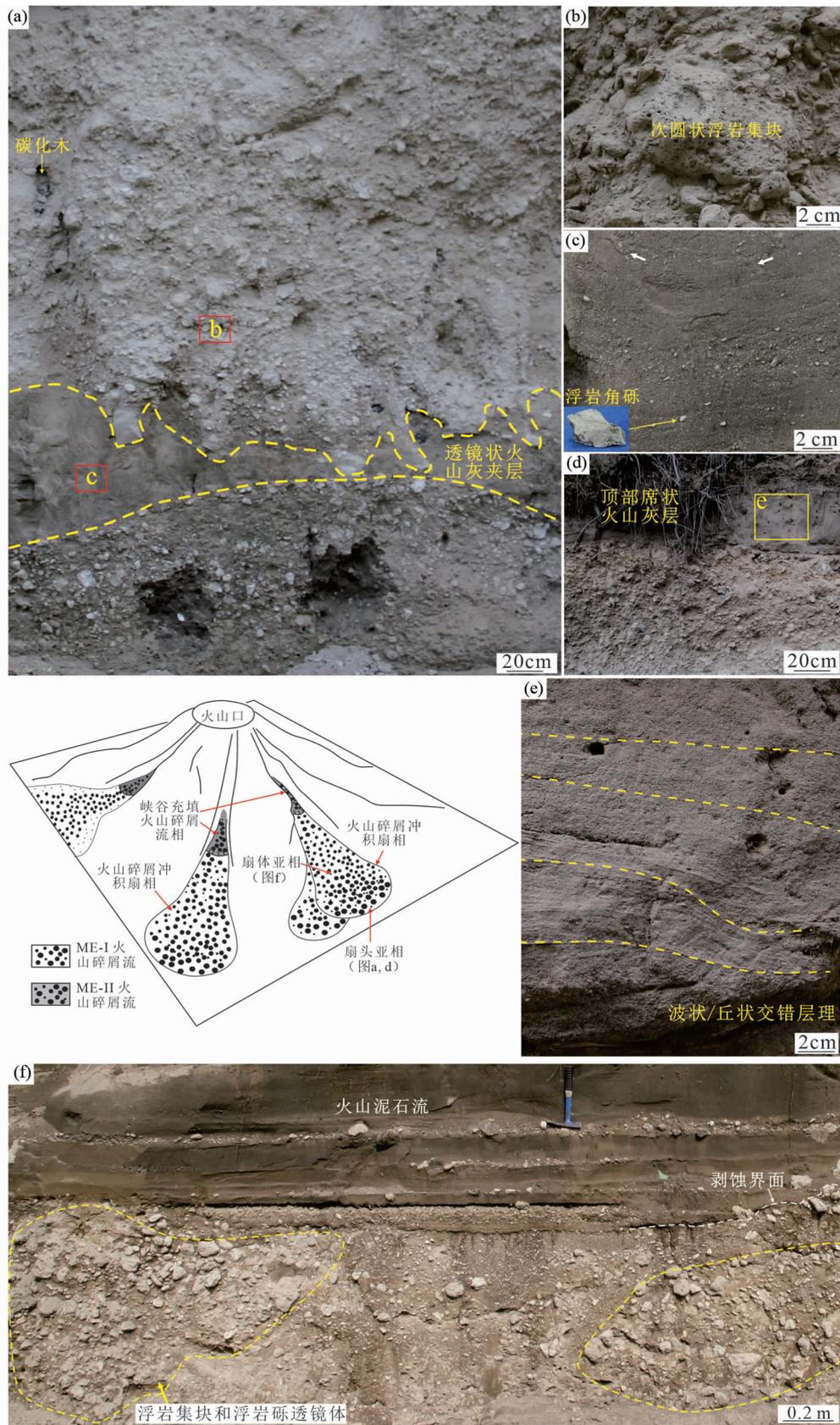


图 8 长白山千年大喷发 ME- I 火山碎屑流冲击扇相典型堆积特征

(a) 具有多个粗碎屑堆积单元和透镜状火山灰夹层的扇头亚相典型宏观照片；(b) 图 a 上部粗碎屑堆积单元，可见磨圆的浮岩砾；(c) 图 a 中部透镜状火山灰夹层；(d) 剖面最顶部发育的席状火山灰层；(e) 席状火山灰层中的波状和丘状交错层理；(f) 扇体亚相典型堆积特征。图 a-

e均来自图1a中1号剖面,图f剖面位置见图1a中2号剖面

Fig. 8 Representative fan-shaped PDCs that were produced by ME- I

(a) typical photo of the fan head subfacies with multiple coarse clastic stacking units and lenticular volcanic ash intercalation; (b) close-up photo of the upper coarse clastic unit in Fig. 8a that shows sub-rounded pumice lapilli; (c) close-up photo of the middle lenticular volcanic ash intercalation; (d) volcanic ash layer developed at the top; (e) close-up photo of waves and hummocky cross bedding in the top volcanic ash layer in panel d; (f) representative fan-shaped PDCs-Fan body subfacies

表2 长白山千年大喷发 ME- I 和 ME- II 两个喷发阶段火山碎屑流堆积特征

Table 2 Characteristics of the PDCs emplaces produced by the ME- I and ME- II of ME

喷发阶段	相	亚相	地质特征		
			平均厚度	火山碎屑物构成	构造
ME- I	峡谷充填火山碎屑流相	块状峡谷充填亚相	5~8m	主要由灰色浮岩砾、集块(两者占60%~70%左右)和火山灰(25%左右)构成,浮岩砾和集块次圆状,分选差,弱熔结,基质支撑。围岩角砾占5%左右	无层理,富含碳化木
		扇头亚相	5~8m	由多层以灰色浮岩集块和浮岩砾为主要碎屑成分(占70%~75%左右)的堆积单元纵向叠置构成,浮岩次圆状,颗粒-基质支撑,基本不含围岩角砾;火山灰级碎屑占20%~25%左右(主要成分为小浮岩颗粒,晶屑、灰色玻屑和围岩碎屑)。粗碎屑堆积单元间夹有多层透镜体状火山灰夹层,火山灰级颗粒>90%(主要为灰色玻屑,含有少量浮岩角砾<10%)。火山碎屑堆积体最顶部通常具有一层席状火山灰层,粒度较透镜状火山灰夹层稍粗	粗碎屑堆积单元为块状构造,层理不发育;火山灰夹层一般也为块状构造;最顶部席状火山灰层发育波状层理或丘状交错层理
	扇体亚相	1~2m	主要由灰色浮岩砾构成(占60%左右),次圆状,分选差,基质支撑,富火山灰(火山灰含量占35%左右),含5%左右围岩角砾	单一单元,块状构造,无层理,火山砾在火山灰基质中局部聚集呈现透镜状	
ME- II	峡谷充填火山碎屑流相	块状峡谷充填亚相	20~30m	火山碎屑以黑色和灰白色两种浮岩砾和集块为主(黑色浮岩10%左右,灰白色浮岩占5%左右),次圆状,分选差,中等熔结,基质支撑,火山灰含量高(20%~25%左右),火山灰为黑色(主要由小颗粒黑色和灰白色浮岩、棕色玻屑和岩屑构成);围岩角砾含量较高,占60%左右	峡谷上段多为块状构造,无层理,局部发育柱状节理
		层状峡谷充填亚相	40~60m	火山碎屑以黑色和灰白色两种浮岩砾和集块为主(黑色浮岩10%左右,白色浮岩5%左右),次圆状,分选差,中等熔结,基质支撑,火山灰含量高(20%~25%左右),火山灰为黑色(主要由小颗粒黑色和灰白色浮岩、棕色玻屑和岩屑构成);围岩角砾含量较高,占55%~60%左右	峡谷下段常见,发育厚层平行层理,每个堆积单元均为逆粒序

地形控制(图6a, c)。构成这两种亚相的浮岩堆积物具有一些共同特征,如两者均以浮岩集块、浮岩砾、围岩角砾和火山灰混杂堆积为主,浮岩集块和浮岩砾具有一定磨圆(图6b),围岩岩屑和火山灰比例均较高,火山碎屑分选差,各粒级颗粒分布较为平均(图7a, b)。另外,这两种亚相火山碎屑的熔结程度均较高,局部发育柱状节理(图6a)。两种亚相的主要差别在于块状峡谷充填亚相为块状构造,不发育层理(图6a、图7a),而层状峡谷充填亚相发育厚层平行层理(图6c, d、图7b)。平行层理由多个层状堆积单元纵向叠置构成,单元内部火山碎屑具有逆粒序特征,堆积单元顶部通常包含大量浮岩集块(图6d、图7b)。千年大喷发第一阶段

(ME- I)峡谷充填火山碎屑流相发育相对较差,仅在南坡大峡谷尾段鸭绿江沿岸有零星块状峡谷充填亚相露头保存(图6e)。与ME- II峡谷充填火山碎屑流相比,其堆积特征的不同点在于所含岩屑含量相对较少,火山灰含量更高(图7c),熔结程度较低,并含有大量碳化木(图6f)。

5.2 火山碎屑流冲积扇相

ME- II 由于喷发规模较小,其火山碎屑流堆积仅发育更靠近喷发中心的峡谷充填火山碎屑流相(Horn and Schmincke, 2000; Sun *et al.*, 2017)。而ME- I 虽然峡谷充

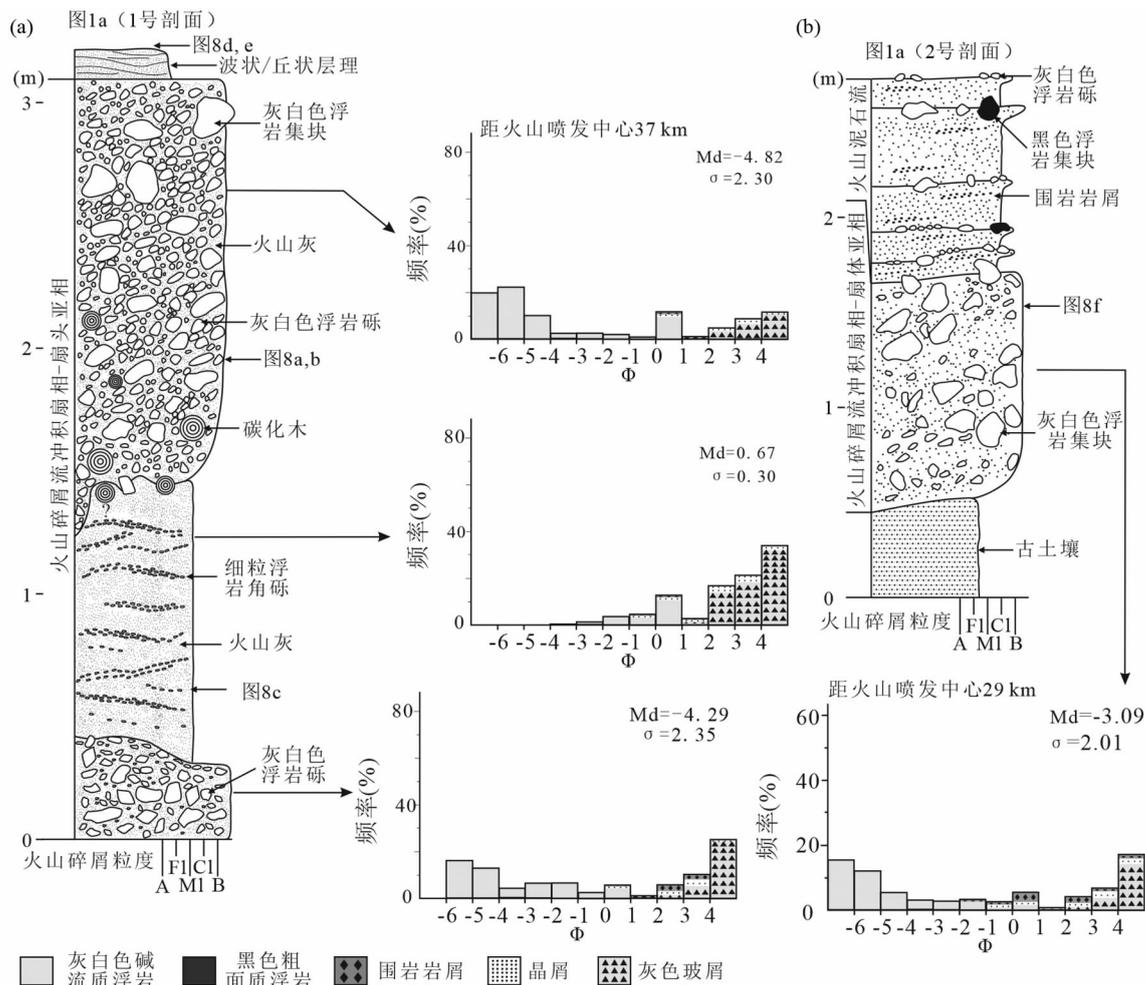


图9 长白山千年大喷发 ME- I 火山碎屑流冲击扇相典型垂向序列和粒度、成分特征

(a) 扇头亚相典型垂向堆积序列和粒度-成分频率分布直方图; (b) 扇体亚相典型垂向堆积序列和粒度-成分频率分布直方图

Fig.9 Typical vertical sequence and size distribution histograms of the fan shaped PDCs that were produced by ME- I

(a) typical vertical sequence and frequency and componentry histograms of the fan head sub-facies; (b) typical vertical sequence and frequency and componentry histograms of the fan body sub-facies

填不发育,却在远喷发中心(距喷发中心 23 ~ 45km 左右范围内)较为平坦的熔岩流台地上形成了大规模的扇状火山碎屑流冲击扇相堆积(刘祥, 2006)。其中位于扇体末端的扇头亚相一般由多个粗碎屑堆积单元垂向叠置构成(图 8a、图 9a),粗碎屑堆积单元以浮岩集块、浮岩砾和火山灰混杂堆积为主要特征,无粒序(图 8a, b),浮岩具有一定磨圆,为次圆状(图 8b),分选中等-差,火山灰含量高(图 9a),含有大量碳化木(图 8a);在粗碎屑堆积单元间常发育薄层透镜状火山灰夹层(图 8a, c、图 9a),火山灰层中部分布有棱角状细粒浮岩角砾(图 8c);另外,扇头亚相最顶部通常发育一层席状火山灰层,厚度在 30 ~ 40cm 左右(图 8d、图 9a)。该席状火山灰层中波状或丘状交错层理极为发育(图 8e)。位于扇体中部和尾部的扇体亚相多由单一堆积单元构成(图 8f、图 9b)。浮岩集块含量相对减少,火山灰含量较扇头亚相增多(图 9b);另外该亚相中常见火山集块和火山砾在细碎屑基质中聚集成多个具有拖尾结构的透镜体(图 8f)。

火山碎屑流冲击扇相与峡谷充填火山碎屑流相相比,堆积特征具有一些显著差异:在堆积厚度上,火山碎屑流冲击扇相无论是扇头还是扇体亚相厚度均较薄,多数在 2 ~ 8m 以内,厚度远远小于峡谷充填火山碎屑流相;在粒度特征上,火山碎屑流冲击扇相除了火山灰夹层外,扇头和扇体亚相粗碎屑堆积单元粒度为明显的双峰式,集块和粗角砾与火山灰同时发育,中间粒级碎屑则相对较少(图 9),而峡谷充填火山碎屑流从集块到火山灰各粒级碎屑分布较为均匀(图 7);在碎屑物成分上,火山碎屑流冲击扇相岩屑含量明显较峡谷充填火山碎屑流相少(图 7、图 9)。

6 讨论

6.1 千年大喷发火山碎屑流不同亚相堆积特征变化原因

参考 Sulpizio *et al.* (2014) 等学者进行的火山碎屑搬运

堆积过程模拟实验和世界典型火山的火山碎屑堆积模型 (Cas and Wright, 1987; Fierstein and Hildreth, 1992; Branney and Kokelaar, 2002; Fierstein and Wilson, 2005; Vazquez and Ort, 2006; Castruccio *et al.*, 2010), 对长白山千年大喷发不同亚相火山碎屑流的搬运和堆积过程进行了分析, 初步探讨了长白山千年大喷发火山碎屑流不同亚相堆积特征变化原因。

火山碎屑流(Pyroclastic density currents-PDCs)由普林尼式火山喷发柱垮塌产生, 属于重力流的一种(White and Houghton, 2006; Arce *et al.*, 2003; Houghton *et al.*, 2004; Sulpizio *et al.*, 2010)。集块、角砾等粗碎屑和火山灰共同搬运并堆积是其一般特征(Branney and Kokelaar, 2002)。Sulpizio *et al.* (2014)进行了一系列实验来模拟火山碎屑流的搬运和堆积过程。通过建立无地形限制和有地形限制两种实验模型, Sulpizio *et al.* (2014)分别模拟了火山碎屑流在平坦地形和峡谷地形中的搬运和堆积过程, 并结合与现代火山堆积现象的对比(Sulpizio *et al.*, 2010), 对这两种堆积环境中典型堆积现象的成因机制进行了火山堆积动力学解释。本文参照该实验结果, 对长白山千年大喷发火山碎屑流不同亚相堆积特征变化所反映的搬运和堆积过程进行了分析。在无地形限制堆积模型中, 火山碎屑流在平坦地形表现为大纵横比扇状堆积 Sulpizio *et al.* (2014); 扇头位置颗粒最粗, 反映了火山碎屑流头部具有最强的搬运能量; 质量相对较小的小颗粒碎屑物动能也相对较小, 因此向扇体方向细碎屑比例逐渐增多。长白山千年大喷发 ME-I 火山碎屑流冲击扇相从扇头到扇体粒度也有逐渐变细的趋势(图 10a), 与该实验结果具有较为良好的吻合性, 因此不同粒级颗粒在搬运过程中动能的差异可能是这种粒度变化产生的主要原因之一(当然还需要进一步的研究进行论证)。在地形限制模型中, 火山碎屑流也表现为一个粗碎屑含量极高的头部, 向尾部粒度有一定程度减小, 但受地形限制, 整体动能均较强, 粒度分异作用没有平坦地形强烈(Sulpizio *et al.*, 2010), 实验结果也可以较好的解释 ME-II 峡谷充填火山碎屑流粒度分异较差的特点(图 10b)。

Vazquez and Ort (2006)通过对美国 Hopi Buttes 火山碎屑流堆积横向相变特征进行研究, 提出火山碎屑流搬运过程中, 随着与喷发中心距离的增加, 火山碎屑流的单元构成也会发生规律性变化: 近喷发中心表现为混杂的单一单元火山碎屑流堆积; 远喷发中心受地形坡折、搬运能量脉动式变化等因素的影响, 火山碎屑流最下部的火山碎屑先开始发生堆积作用并停止搬运, 但其上的火山碎屑仍有较大搬运能量, 并超越已经发生堆积的下部火山碎屑层形成新的火山碎屑流单元。这样从下到上, 由近及远逐次发生的堆积-搬运超覆作用, 使近喷发中心原本单一的火山碎屑流单元发生分离增生作用, 生成多个火山碎屑流单元, 最终形成垂向叠置的多单元粗火山碎屑堆积层; 漂浮在火山碎屑流上方的低密度灰云浪不断被卷入向前搬运和堆积的粗碎屑流单元之间, 形

成粗碎屑层之间的透镜状火山灰夹层; 另外灰云浪中背向搬运方向的湍流形成了火山碎屑流堆积体最顶部具有波状和丘状交错层理的火山灰层。值得注意的是, 这种火山碎屑流单元横向相变发生部位与距发中心的距离并不固定, 并随着火山碎屑流规模的增大向远喷发中心移动, 即规模大的火山碎屑流其开始发生单元分离增生作用的部位要比小规模火山碎屑流距喷发中心远的多。参照这种火山碎屑流横向相变机制, 可尝试对长白山千年大喷发火山碎屑流不同亚相主要堆积特征的差异进行解释: 对于 ME-I 火山碎屑流冲击扇, 由于火山碎屑流规模巨大, 火山碎屑流单元增生分离点距离喷发中心较远(大体位于扇状堆积体中到末端附近)。火山碎屑流搬运到该部位后堆积单元发生分离增生作用(图 10a), 形成多个浮岩集块/浮岩砾堆积单元和透镜状火山灰夹层叠置的扇头亚相垂向堆积序列(图 8a、图 9a、图 10a); 在图 8d, e 中, 扇头亚相顶部具有波状和丘状交错层理的席状火山灰层, 按照 Vazquez and Ort (2006)的火山碎屑流相模式, 可能是灰云浪中背向搬运方向的湍流形成。当然, 其细粒度, 丘状和波状交错层理的特征也符合气水喷发形成的底浪堆积特征, 也有可能为千年大喷发后期一次底浪喷发形成, 还需要进一步的工作进行讨论。火山碎屑流冲积扇相扇体亚相由于距喷发中心相对较近, 火山碎屑流未到达发生分离增生作用的起始位置(图 10a), 因此仅发育单一火山碎屑流单元(图 8f、图 9b)。对于 ME-II 峡谷充填火山碎屑流, 由于喷发规模较小, 火山碎屑流单元分离增生发生在距离喷发中心较近的火山峡谷中部(图 10b)。因此, 峡谷上段火山碎屑流因未发生火山碎屑流单元分离增生作用, 主要为单一单元混杂堆积, 块状构造, 无粒序(图 6a、图 7a、图 10b), 形成了块状峡谷充填亚相; 而发生了火山碎屑流单元分离增生作用的峡谷下段充填的火山碎屑流则发育多个厚层单元叠加形成的平行层理(图 6c、图 7b、图 10b), 即层状峡谷充填亚相。对于 ME-I 峡谷充填火山碎屑流, 由于火山碎屑流规模大, 火山碎屑流单元发生分离增生的部位可能不在峡谷内(大体位于扇状堆积体中到末端附近), 即使在峡谷下段也不发生火山碎屑流单元分离增生, 因此为单一单元堆积(图 6e、图 7c)。

6.2 千年大喷发火山碎屑流相模式

根据长白山千年大喷发火山碎屑流不同相和亚相的堆积特征和搬运-堆积过程分析, 总结了千年大喷发火山碎屑流相模式。千年大喷发第一阶段(ME-I)形成了该区分布最为广泛的火山碎屑流堆积。其超过 25km 高的巨型喷发柱将火山碎屑喷入高空(Yu *et al.*, 2013), 随着喷发能量的减弱, ME-I 巨大的火山喷发柱发生垮塌形成沿地表搬运的火山碎屑流; 巨大的动能将大部分 ME-I 火山碎屑流堆积物搬运至远离火山口和火山锥体, 地形平缓的熔岩台地处堆积(最远 40~45km), 形成远火山口平坦熔岩台地广泛分布的火山碎屑流冲积扇相堆积。在搬运过程中, 原本单一的火山

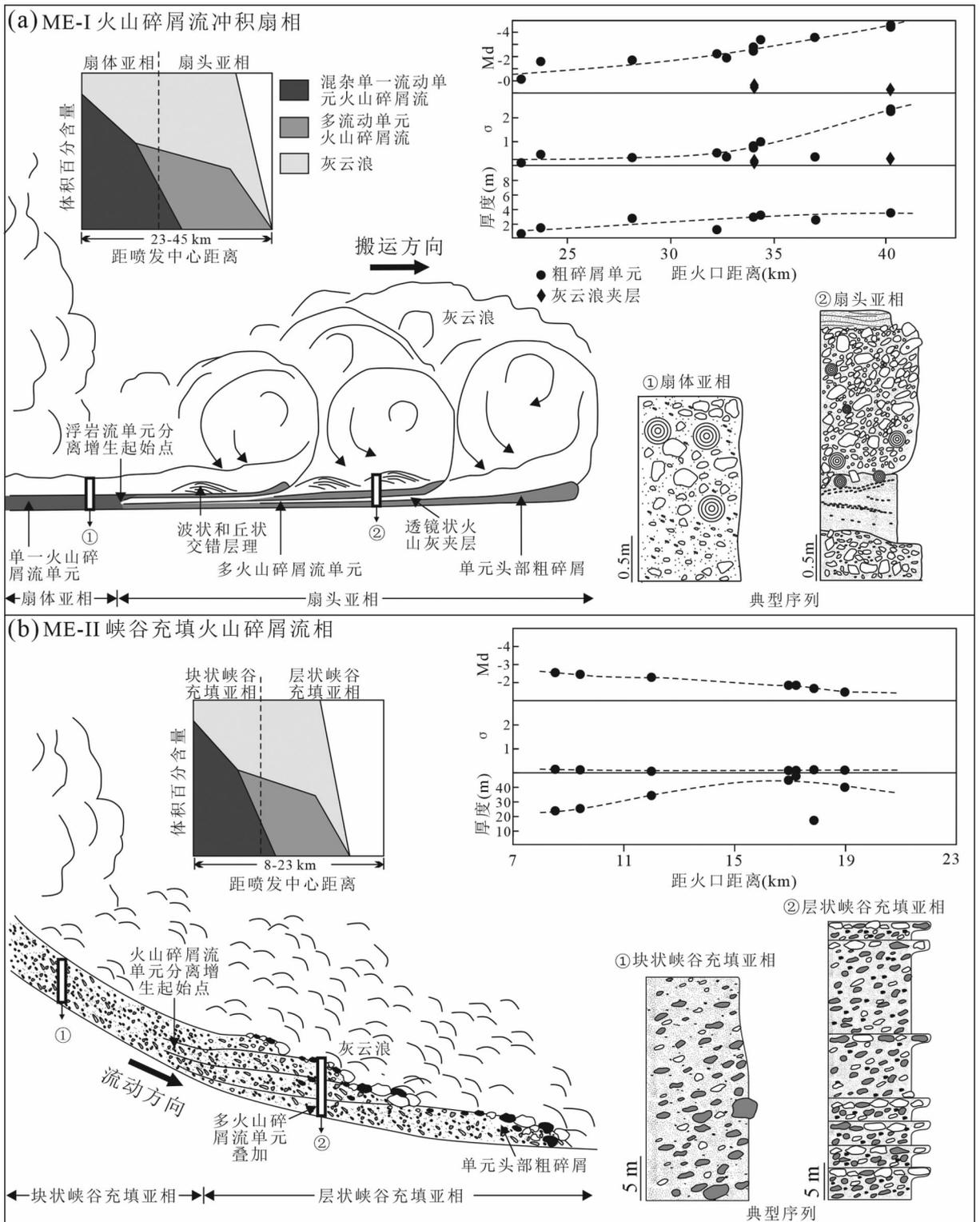


图 10 长白山千年大喷发火山碎屑流搬运和堆积过程及相模式

(a) ME-I 火山碎屑流冲积扇相; (b) ME-II 峡谷充填火山碎屑流相 (据 Vazquez and Ort, 2006; Sulpizio *et al.*, 2014 修改). 不同搬运-堆积样式火山碎屑流体积与喷发源距离的关系角图为 Vazquez and Ort (2006) 针对美国 Hopi Buttes 火山碎屑流横向相变研究得出, 本次研究仅用其示意性表示长白山千年大喷发两个不同阶段火山碎屑流搬运-堆积样式与喷发中心距离的关系

Fig. 10 Cartoon that illustrates the transportation and deposition processes, and the facies model of the ME PDCs

(a) ME-I fan shaped PDCs facies; (B) ME-II c canyon filling PDCs facies (modified after Vazquez and Ort, 2006; Sulpizio *et al.*, 2014)

碎屑流单元(扇体亚相)在扇体中-远端发生火山碎屑流单元分离增生作用,生成多个次级火山碎屑流单元,最终形成扇头亚相垂向叠置的多单元粗火山碎屑堆积层和粗碎屑单元之间的火山灰夹层(图 10a)。随后开始的千年大喷发第二阶段(ME-II),由于规模相对 ME-I 较小,较弱的搬运能量不足以将该阶段火山碎屑大量搬运出火山峡谷,因此形成了长白山周缘峡谷地貌中充填的主要火山碎屑堆积物。该阶段火山碎屑流在搬运至峡谷下段后,混杂单一的火山碎屑流单元发生分离增生作用,形成多单元纵向叠置的厚层平行层理,由峡谷充填火山碎屑流相的块状峡谷充填亚相过渡为层状峡谷充填亚相(图 10b)。

6.3 ME-II 与 ME-I 火山碎屑流熔结程度差异的可能原因

在野外地质考察中发现,ME-I 火山碎屑流中普遍发育碳化木,ME-II 火山碎屑流中局部发育柱状节理,这些现象是这两期火山碎屑流搬运和堆积时具有高温特征的反映。而高温会造成火山碎屑流发生一定程度的熔结作用(Cas and Wright, 1987; Quane and Russell, 2005)。虽然都具有高温的特征,但是 ME-I 和 ME-II 火山碎屑流熔结程度却具有一定的差异,即 ME-II 火山碎屑流的熔结程度要强于 ME-I 火山碎屑流。目前,熔结程度差异的原因还不是十分清楚。相关研究表明,火山碎屑流堆积的厚度可能对熔结程度的变化起到了较为关键的作用。厚层火山碎屑流热量散失较慢,一般熔结程度相对较高(Quane and Russell, 2005)。ME-II 火山碎屑流主要为峡谷充填,平均厚度 30m 左右,而 ME-I 火山碎屑流主要为火山碎屑流冲积扇堆积,其厚度较薄。因此,厚度造成的热量散失速率快慢可能是造成二者熔结程度不同的关键因素之一。另外,火山碎屑流的成分差异和搬运距离也可能是造成两者熔结程度差异的另外两种关键因素。ME-I 灰白色浮岩成分为碱流质,ME-II 黑色浮岩成分为粗面质,根据地质温度计的计算结果,ME-II 中的粗面质浮岩具有较 ME-I 碱流质浮岩更高的岩浆温度(Pan *et al.*, 2017),这种更高的岩浆初始温度也可能促使 ME-II 熔结程度更高。ME-I 搬运的距离最远达 45km,长距离搬运造成的热量散失也可能造成 ME-I 熔结程度弱于 ME-II。该问题还需要进一步的详细研究加以论证。

6.4 ME-I 峡谷充填火山碎屑流相不发育的可能原因

对于规模巨大的千年大喷发 ME-I 火山碎屑流为何在更靠近喷发中心火山峡谷中充填反而较少的原因,目前还没有具有可靠证据的研究成果发表。从千年大喷发的喷发过程和火山碎屑流搬运过程上,有如下两种可能解释:(1)是千年大喷发 ME-I 喷发结束后,地下继续蓄积的粗面质岩浆形成了 ME-II 喷发。ME-II 阶段喷发存在脉冲性持续喷发特点,温度高,其形成的火山碎屑流压盖破坏了沟谷中 ME-I 火山碎屑流堆积物,在沟谷内形成了规模巨大的 ME-II 火山碎屑流堆积,且使 ME-I 仅在沟谷外裙装分布;(2)可能由于

ME-I 火山碎屑流规模过于巨大,搬运能量过高,大部分火山碎屑流被搬运出峡谷,造成靠近喷发中心的峡谷充填反而较少。当然,对于真正原因,目前由于缺少针对性、系统性研究工作,还无法取得可靠结论,需要进一步开展野外地质和实验室模拟等研究工作。

6.5 火山灾害

根据长白山天池火山演化的旋回性规律和破火山口阶段的喷发序列,长白山未来具有再次形成大规模火山碎屑流发的危险性(Stone, 2010, 2011; Xu *et al.*, 2012; Wei *et al.*, 2013)。该研究可以帮助我们进一步认识长白山爆炸式喷发产生的火山碎屑流堆积物的空间分布特征和分布规律。根据千年大喷发火山碎屑流的最大分布范围和厚度,本次研究认为,类似长白山千年大喷发级别的火山碎屑流可以到达距长白山天池火山口至少 45km 处,并且为影响范围较大的扇状分布,扇头厚度可达 3~5m,掩埋高度在一至二层楼高左右,在这个范围内具有巨大的火山碎屑流灾害风险。

7 结论

(1)根据火山碎屑流堆积特征,将长白山千年大喷发火山碎屑流分为峡谷充填火山碎屑流相(包括块状峡谷充填亚相和层状峡谷充填亚相)和火山碎屑流冲击扇相(扇头亚相和扇体亚相)等两相四亚相。峡谷充填火山碎屑流相主要发育在天池火山锥体周缘距离喷发中心 8~23km 左右范围内(坡度在 15°~60°之间)的火山 U 型谷中,横向分布受峡谷限制,峡谷两侧的火山碎屑流堆积物较少;火山碎屑流冲积扇相主要发育在距离喷发中心 23~45km 左右,地形相对平缓的熔岩台地处(坡度在 5°~15°之间)。由于地势平缓,火山碎屑流的搬运不受地形限制,一般形成较大纵横比扇状堆积。

(2)粗碎屑和较高含量的火山灰共存是峡谷充填火山碎屑流相和火山碎屑流冲积扇相的共同特征。不同点在于峡谷充填火山碎屑流相碎屑颗粒分选较火山碎屑流冲积扇相差,各粒级颗粒分布较为平均,岩屑含量高;而火山碎屑流冲积扇相具有粗碎屑和细碎屑双峰式粒度分布特征,缺少中间粒级颗粒,岩屑含量少。

(3)火山碎屑流在搬运过程中,受地形坡折变化和搬运能量脉动式变化的影响,会发生火山碎屑流单元分离增生作用,在堆积体末端形成多个火山碎屑流单元叠合的现象。火山碎屑流单元分离增生起始点距喷发中心的远近受火山碎屑流规模的影响。对于 ME-I 大规模火山碎屑流,该起始点位于火山碎屑流冲积扇中到末端,造成火山碎屑流冲积扇扇头亚相发育多个粗碎屑堆积单元夹火山灰夹层堆积,而扇体亚相仅发育单个堆积单元。ME-II 火山碎屑流规模较小,该起始点位于火山峡谷中部左右,是火山峡谷下段发育层状峡谷充填亚相的关键因素。

(4) 如果再次发生与长白山千年大喷发类似规模的普林尼式喷发, 至少距长白山天池火山喷发中心 45km 范围内具有巨大的火山碎屑流灾害风险。

References

- Arce JL, Macías JL and Vázquez-Selem L. 2003. The 10.5ka Plinian eruption of Nevado de Toluca volcano, Mexico: stratigraphy and hazard implications. *GSA*, 115(2): 230–248
- Branney MJ and Kokelaar BP. 2002. Pyroclastic density currents and the sedimentation of ignimbrites. London: Geological Society of London, 143
- Cas RAF and Wright JV. 1987. Volcanic Successions, Modern and Ancient: A Geological Approach to Processes, Products and Successions. London: Allen and Publishing House & Unwin (Publishers) Ltd
- Castruccio A, Clavero J and Rivera A. 2010. Comparative study of lahars generated by the 1961 and 1971 eruptions of Calbuco and Villarrica volcanoes, Southern Andes of Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190(3–4): 297–311
- Dostal J, Dupuy C, Zhai M and Zhi X. 1988. Geochemistry and origin of Pliocene alkali basaltic lavas from Anhui-Jiangsu, Eastern China. *Geochemical Journal*, 22(4): 165–176
- Fierstein J and Hildreth W. 1992. The plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Katmai National Park, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 54(8): 646–684
- Fierstein J and Wilson CJN. 2005. Assembling an ignimbrite: compositionally defined eruptive packages in the 1912 valley of ten thousand smokes ignimbrite, Alaska. *Geological Society of America Bulletin*, 117(7–8): 1094–1107
- Guo ZF, Liu JQ, Sui SZ, Liu Q, He HY and Ni YY. 2002. The mass estimation of volatile emission during 1199–1200 AD eruption of Baitoushan volcano and its significance. *Science in China (Series D)*, 45(6): 530
- Hetland EA, Wu FT and Song JL. 2004. Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver functions. *Tectonophysics*, 386(3–4): 157–175
- Horn S and Schmincke HU. 2000. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bulletin of Volcanology*, 61(8): 537–555
- Houghton BF, Wilson CJN, Fierstein J and Hildreth W. 2004. Complex proximal deposition during the Plinian eruptions of 1912 at Novarupta, Alaska. *Bulletin of Volcanology*, 66(2): 95–133
- Jin BL and Zhang XY. 1994. Researching Volcanic Geology in Mount Changbai. Yanbian: Northeast Korea Nationality Education Press, 1–223 (in Chinese)
- Kern AK, Kovar-Eder J, Stachura-Suchoples K, Wang WM and Wang P. 2016. Radiometric dating re-evaluating the paleoenvironment and paleoclimate around the Plio-Pleistocene boundary in NE China (Changbai Mountains). *Review of Palaeobotany and Palynology*, 224: 134–145
- Li N, Fan QC, Sun Q and Zhang WL. 2004. Magma evolution of Changbaishan Tianchi volcano: Evidence from the main phenocrystal minerals. *Acta Petrologica Sinica*, 20(3): 575–582 (in Chinese with English abstract)
- Li N, Fan QC, Sun Q and Pan XD. 2008. The implication of melt inclusion for the millennium eruption of Changbaishan Tianchi volcano. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2604–2614 (in Chinese with English abstract)
- Liu JQ and Wang SS. 1984. Age of Changbaishan volcano and Tianchi Lake. *Chinese Science Bulletin*, 29(2): 229–232
- Liu JQ. 1987. Study on geochronology of the Cenozoic volcanic rocks in Northeast China. *Acta Petrologica Sinica*, 32(4): 21–31 (in Chinese with English abstract)
- Liu JQ, Chen SS, Guo ZF, Guo WF, He HY, You HT, Kim HM, Sung GH and Kim H. 2015. Geological background and geodynamic mechanism of Mt. Changbai volcanoes on the China-Korea border. *Lithos*, 236–237: 46–73
- Liu RX, Li JT, Wei HQ, Xu DM and Zheng XS. 1992. Volcano at Tianchi Lake, Changbaishan Mt. a modern volcano with potential danger of eruption. *Acta Geophysica Sinica*, 35(5): 661–665 (in Chinese with English abstract)
- Liu X and Xiang TY. 1997. Cenozoic Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Northeast China: Resources and Hazards. Changchun: Jilin University Publishing House, 1–161 (in Chinese)
- Liu X, Sui WG and Wang XK. 2000. Lahar deposition of 1000 a. B. P. Eruption at Changbaishan volcano and their hazards. *Journal of Changchun Science and Technology University*, 30(1): 14–17 (in Chinese with English abstract)
- Liu X. 2006. Sequence and distribution of the pyroclastic deposits of the greatest eruption of Changbaishan volcano during the period of history. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 36(3): 314–318 (in Chinese with English abstract)
- Luan P, Xu JD, Pan B, Yu HM and Zhao B. 2009. Preliminary study on geomorphic characteristics of eruptive products of Tianchi Volcano, Changbai Mountains. *Journal of Seismological Research*, 32(2): 183–187 (in Chinese with English abstract)
- Lü BS, Li CJ and Han CG. 2005. Study on volcanic landforms in Changbai Mountain. *Journal of Yanbian University (Natural Science)*, 31(4): 303–307 (in Chinese with English abstract)
- Machida H and Arai F. 1983. Extensive ash falls in and around the Sea of Japan from large Late Quaternary eruptions. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 18(1–4): 151–164
- Machida H, Moriwaki H and Zhao DC. 1990. The recent major eruption of Changbai volcano and its environmental effects. *Geographical Reports of Tokyo Metropolitan University*, 1–20
- Manville V, Németh K and Kano K. 2009. Source to sink: A review of three decades of progress in the understanding of volcanoclastic processes, deposits, and hazards. *Sedimentary Geology*, 220(3–4): 136–161
- Pan B, de Silva SL, Xu JD, Chen ZQ, Miggins DP and Wei HQ. 2017. The VEI-7 Millennium eruption, Changbaishan-Tianchi volcano, China/DPRK: New field, petrological, and chemical constraints on stratigraphy, volcanology, and magma dynamics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 343: 45–59
- Quane SL and Russell JK. 2005. Ranking welding intensity in pyroclastic deposits. *Bulletin of Volcanology*, 67(2): 129–143
- Shan XJ, Ye H and Chen GM. 2002. Revealing distribution of modern eruption of Changbaishan mountain Tianchi volcano by ERS-2 SAR image. *Quaternary Sciences*, 22(2): 123–130 (in Chinese with English abstract)
- Shi LB, Chen XD, Yang QF, Wei HQ and Lin CY. 2005. Petrochemistry of pumices of various colors produced by the eruption of Changbaishan Tianchi volcano at 1000 years ago. *Seismology and Geology*, 27(1): 73–82 (in Chinese with English abstract)
- Stone R. 2010. Is China's riskiest volcano stirring or merely biding its time? *Science*, 329(5991): 498–499
- Stone R. 2011. Vigil at North Korea's Mount Doom. *Science*, 334(6056): 584–588
- Sui JL, Fan QC, Liu JQ and Guo ZF. 2007. Mantle heterogeneity beneath Changbaishan volcanic province: Evidence from geochemical study on trace elements and isotopes. *Acta Petrologica Sinica*, 23(6): 1512–1520 (in Chinese with English abstract)
- Sulpizio R, Bonasia R, Dellino P, Mele D, Di Vito MA and La Volpe L. 2010. The Pomici di Avellino eruption of Somma-Vesuvius (3.9 ka BP). Part II: sedimentology and physical volcanology of pyroclastic density current deposits. *Bulletin of Volcanology*, 72(5): 559–577
- Sulpizio R, Dellino P, Doronzo D and Sarocchi D. 2014. Pyroclastic density currents: state of the art and perspectives. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 283: 36–65
- Sun CQ, Plunkett G, Liu JQ, Zhao HL, Sigl M, McConnell JR, Pilcher JR, Vinther B, Steffensen JP and Hall V. 2014a. Ash from Changbaishan millennium eruption recorded in Greenland ice: Implications for determining the eruption's timing and impact. *Geophysical Research Letters*, 41(2): 694–701
- Sun CQ, You HT, Liu JQ, Li X, Gao JL and Chen SS. 2014b. Distribution, geochemistry and age of the Millennium eruptives of Changbaishan volcano, Northeast China: A review. *Frontiers of*

- Earth Science, 8(2): 216–230
- Sun CQ, Liu JQ, You HT and Nemeth K. 2017. Tephrostratigraphy of Changbaishan volcano, Northeast China, since the Mid-Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 177: 104–119
- Tang YC, Obayashi M, Niu FL, Grand SP, Chen YJ, Kawakatsu H, Tanaka S, Ning J and Ni JF. 2014. Changbaishan volcanism in Northeast China linked to subduction-induced mantle upwelling. *Nature Geoscience*, 7(6): 470–475
- Vazquez JA and Ort MH. 2006. Facies variation of eruption units produced by the passage of single pyroclastic surge currents, Hopi Buttes volcanic field, USA. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(3–4): 222–236
- Wang PJ and Chen SM. 2015. Cretaceous volcanic reservoirs and their exploration in the Songliao Basin, Northeast China. *AAPG Bulletin*, 99(3): 499–523
- Wei HQ, Li CM, Jin BL, Jin JY and Gao L. 2005. The Tianchi formation cone eruptive agmatic evolutionary series of the Changbaishan and stratigraphic division. *Jilin Geology*, 24(1): 22–27 (in Chinese with English abstract)
- Wei HQ, Liu GM and Gill J. 2013. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, Northeast China; implications for possible future eruptions. *Bulletin of Volcanology*, 75(4): 706
- White JDL and Houghton BF. 2006. Primary volcanoclastic rocks. *Geology*, 34(8): 677–680
- Xu JD, Liu GM, Wu JP, Ming YH, Wang QL, Cui DX, Shanguan ZG, Pan B, Lin XD and Liu JQ. 2012. Recent unrest of Changbaishan volcano, Northeast China: A precursor of a future eruption? *Geophysical Research Letters*, 39: L16305
- Xu JD, Pan B, Liu TZ, Hajdas I, Zhao B, Yu HM, Liu RX and Zhao P. 2013. Climatic impact of the Millennium eruption of Changbaishan volcano in China; New insights from high-precision radiocarbon wiggle-match dating. *Geophysical Research Letters*, 40: 54–59
- Yang LK, Wang F, Feng HL, Wu L and Shi WB. 2014. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ Ar geochronology of Holocene volcanic activity at Changbaishan Tianchi volcano, Northeast China. *Quaternary Geochronology*, 21: 106–114
- Yang QF and Bo JS. 2007. Status quo and prospects for research on Tainchi volcano in Changbai Mountain. *Journal of Natural Disasters*, 16(6): 133–139 (in Chinese with English abstract)
- Yang QF, Shi LB, Zhang Y, Chen B and Chen XD. 2007. Grain-size characteristics of the millennium pyroclastic flow deposits of Tianchi volcano and their geological implications. *Seismology and Geology*, 29(3): 480–491 (in Chinese with English abstract)
- Yi J, Wang PJ, Shan XL, Wang HF, Sun S and Chen HC. 2019. Lahar deposits generated after the Millennium eruption of the Changbaishan Tianchi volcano in the Erdaobaihe River system, China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 380: 1–18
- Yin JH, Zheng YG and Liu YX. 2005. The radiocarbon age of carbonized wood in Tianchi volcano, Changbaishan Mountain and its implication. *Seismology and Geology*, 27(1): 83–88 (in Chinese with English abstract)
- Yin JH, Jull AJT, Burr GS and Zheng YG. 2012. A wiggle-match age for the millennium eruption of Tianchi volcano at Changbaishan, Northeastern China. *Quaternary Science Reviews*, 47: 150–159
- Yu HM, Xu JD, Luan P, Zhao B and Pan B. 2013. Probabilistic assessment of tephra fallout hazard at Changbaishan volcano, Northeast China. *Natural Hazards*, 69(3): 1369–1388
- Zhang ML, Guo ZF, Liu JQ, Liu GM, Zhang LH, Lei M, Zhao WB, Ma L, Sepe V and Ventura G. 2018. The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): A review on eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamics and potential hazards. *Earth Science Reviews*, 187: 19–52
- Zhao B, Xu JD and Yu HM. 2010. Grain-size characteristics of pyroclasts in Changbaishan Mountain area. *Seismology and Geology*, 32(2): 233–243 (in Chinese with English abstract)
- Zhao DP and Liu L. 2010. Deep structure and origin of active volcanoes in China. *Geoscience Frontiers*, 1(1): 31–44
- Zou HB, Fan QC, Zhang HF and Schmitt AK. 2014. U-series zircon age constraints on the plumbing system and magma residence times of the Changbai volcano, China/North Korea border. *Lithos*, 200–201: 169–180

附中文参考文献

- 金伯录, 张希友. 1994. 吉林省长白山全新世火山喷发期及火山活动特征. 延边: 东北朝鲜民族教育出版社, 1–223
- 李霓, 樊祺诚, 孙谦, 张文兰. 2004. 长白山天池火山岩浆演化——来自主矿物成分的证据. *岩石学报*, 20(03): 575–582
- 李霓, 樊祺诚, 孙谦, 盘晓东. 2008. 熔体包裹体对长白山天池火山千年大喷发的指示意义. *岩石学报*, 24(11): 2604–2614
- 刘嘉麒, 王松山. 1982. 长白山火山与天池的形成时代. *科学通报*, (21): 1312–1315
- 刘嘉麒. 1987. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. *岩石学报*, 3(4): 21–31
- 刘若新, 李继泰, 魏海泉, 许东满, 郑祥身. 1992. 长白山天池火山——一座具潜在喷发危险的近代火山. *地球物理学报*, 35(5): 661–665
- 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. 长春: 吉林大学出版社, 1–161
- 刘祥, 隋维国, 王锡魁. 2000. 长白山火山1000年前火山泥流堆积及其灾害. *长春科技大学学报*, 30(1): 14–17
- 刘祥. 2006. 长白山火山历史上最大火山爆发火山碎屑物层序与分布. *吉林大学学报(地球科学版)*, 36(3): 313–318
- 栾鹏, 许建东, 潘波, 于红梅, 赵波. 2009. 长白山天池火山喷发物地形地貌特征初步研究. *地震研究*, 32(2): 182–187
- 吕弼顺, 李春景, 韩成国. 2005. 长白山火山锥体及其周边地貌类型研究. *延边大学学报(自然科学版)*, 31(4): 303–307
- 单新建, 叶洪, 陈国光. 2002. 利用ERS-2 SAR图像纹理分析方法揭示长白山天池火山近代喷发物空间分布特征. *第四纪研究*, 22(2): 123–130
- 史兰斌, 陈孝德, 杨清福, 魏海泉, 林传勇. 2005. 长白山天池火山千年大喷发不同颜色浮岩的岩石化学特征. *地震地质*, 27(1): 73–82
- 隋建立, 樊祺诚, 刘嘉麒, 郭正府. 2007. 长白山火山地幔不均一性——微量元素及同位素地球化学研究. *岩石学报*, 23(6): 1512–1520
- 魏海泉, 李春茂, 金伯录, 靳晋瑜, 高玲. 2005. 长白山天池火山造锥喷发岩浆演化系列与地层划分. *吉林地质*, 24(1): 22–27
- 杨清福, 薄景山. 2007. 长白山天池火山的研究现状与展望. *自然灾害学报*, 16(06): 133–139
- 杨清福, 史兰斌, 张羽, 陈波, 陈孝德. 2007. 长白山天池火山千年大喷发火山碎屑流堆积的粒度特征与地质意义. *地震地质*, 29(3): 480–491
- 尹金辉, 郑勇刚, 刘粤霞. 2005. 长白山天池火山炭化木的 ^{14}C 年代及其意义. *地震地质*, 27(1): 83–88
- 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): 233–243