

# 火山地层学与火山架构 :以长白山火山为例

王璞珺, 衣 健, 陈崇阳, 王岩泉

吉林大学地球科学学院, 长春 130061

**摘要:**将长白山火山喷出物按成岩方式和岩相可分为柱状节理熔岩、火山碎屑流和火山泥石流等 20 种基本类型,它们均可构成可识别的 19 种火山地层单元。火山架构是由被火山地层界面所围限的诸多基本地层单元叠置而成。一个复杂的火山组合体,可以通过界面识别,拆分成若干火山地层单元,从而实现火山堆积体的分解描述和整体认知。基性火山喷发区常见的 5 种火山架构(单源火山田、洪泛玄武岩田、熔岩盾火山、中心式火山和层状复合火山),在长白山地区相继发育。本区火山灾害可分为原发和次生 2 种。原发性灾害指火山再次喷发引发的灾害,巨量天池水可沿火山断裂下渗,使气水-岩浆喷发的可能性和爆炸强度增加,同时还能引发火山泥石流。次生灾害主要源于火山碎屑堆积物的再搬运和熔岩火山体的崩塌。熔岩火山在本区分布最广,但其底座常为 3~7 m 厚的松散沉积层,这犹如坐落在软地基之上的摩天大厦,是很不稳定的火山架构。熔岩体下伏的这些风化壳型松散层,只要发生流变或差异性沉降,就会引发山体滑坡和山崩。因此,加强相关基础地质调查,对事关国计民生的重点区段开展次生火山灾害风险评估,势在必行。

**关键词:**火山岩;火山地层学;火山架构;物理火山学;长白山天池火山;火山灾害

**中图分类号:**P317 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5888(2013)02-0319-21

## Volcanostratigraphy and Volcanic Architecture of the Changbaishan Volcanos, NE China

Wang Pujun, Yi Jian, Chen Chongyang, Wang Yanquan

College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061

**Abstract:** Twenty types of volcanic materials ejected from Changbaishan volcanos were classified, such as columnar joint, pyroclastic flow deposits and lahars. Each of them can comprise a stratigraphic unit recognizable in the volcanic successions. Volcanic architectures are composed of these volcanic units bounded by some kind of eruption surfaces or unconformities. Monogenetic volcano fields, flood basalt field, lava shield volcanos, central volcanos and stratovolcanos described by Walker (2000) seem to develop successively from Miocene to Holocene in the area of Changbaishan volcanos. The potential volcanic hazards including both primary and secondary ones should be concerned there. The former indicates re-eruption of Changbaishan volcanos, which can not be predicted at the present but the giant water of  $2 \times 10^9 \text{ m}^3$  contained in the Tianchi lake would trigger intensive phreatomagmatic eruptions and very large lahars in case of eruption some day. The secondary hazards would mainly come from large scale re-transportation of the pyroclastic deposits and rock slide-avalanche of the columnar joint basalts. Because the basaltic lavas are commonly situated on a soft sediment layer of ca. 3-7m which are

**收稿日期:**2012-10-12

**基金项目:**国家级中德合作科研项目(GZ654);国家“973”计划项目(2009CB219303)

**作者简介:**王璞珺(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事盆地火山岩和油气地质勘查研究与教学,E-mail:wangpj@jlu.edu.cn.

composed of polymict gravel, sand, silt and mud. Differential subsidence of the basal sediments above the erosional surface of basement would easily cause the unstable volcanic architectures collapse. Geological survey on volcanic hazards and risk assessment are urgent task in the region of Chanbaishan volcanos.

**Key words:** volcanic rocks; volcanostratigraphy; volcanic architecture; physical volcanology; Changbaishan Tianchi volcanos; volcanic hazards of northeast China

## 0 引言

迄今有关长白山火山研究的中外文献按照研究内容分为 7 类,即构造地质学、矿物岩石学、火山地层学、地球物理学、年代学、地球化学、物理火山学(一篇文献包括上述多项研究内容的,以主要研究目的所对应的研究内容来分类,比如通过地球化学手段来研究矿物岩石特征的,笔者将这类文献归入到矿物岩石学分类中)。2000 年以来相关研究文献明显增多,故以此为时间节点进行分类统计(图 1)。文献源来自 CNKI 中文库和 Web of Science-SCI 及 GeoRef 两个英文库。总体上看,研究内容以矿物岩石学<sup>[1]</sup>、地球物理学<sup>[2]</sup>、物理火山学<sup>[3]</sup>为主,还包括构造地质学<sup>[4]</sup>、年代学<sup>[5]</sup>、地球化学等方面<sup>[6]</sup>。而以火山地层、火山架构<sup>[7]</sup>为研究内容的文章数量很少,2000 年之前基本没有,之后也只有 3 篇部分内容相关的文章。就研究趋势而言,有关长白山火山的发文数量在迅速增加,研究内容所涉及的范围也越来越广,呈现出日新月异的快速发展势头,体现出国内外学者对长白山火山的关注度在不断增加。

火山地层和火山架构可提供火山体的地质组成和结构、喷发旋回、演化趋势和相关危害等多重信息,是灾害预测和评价的基础,在圣海伦斯和夏威夷火山预报和减灾防灾中发挥了至关重要的作用<sup>[8]</sup>。长白山火山研究中,火山地层基本上沿用 20 世纪早期区域地质调查结果,火山架构尚未进行系统研究。长白山地区熔岩火山多属非稳定型火山架构,是滑坡和山崩的地质根源。碎屑岩火山含大量密度小于  $1 \text{ g/cm}^3$  的浮岩,在水饱和条件下极易再次搬运并引发泥石流灾害。要准确评价和预测火山灾害就必须首先认识火山自身的组成和结构,即火山地层和火山机构。笔者将前人研究成果与笔者野外调查所获取的资料相结合,分析研究本区火山喷出物、火山地层单元和火山架构,尝试性探讨火山灾害与火山固有属性(地层和架构)之间的关系,以期促进相关研究的持续和深入,并试图为本区火山灾害研究探索新的途径。

## 1 火山地层学与火山架构

火山喷出物犹如盖房子所用的砖瓦、木料和预

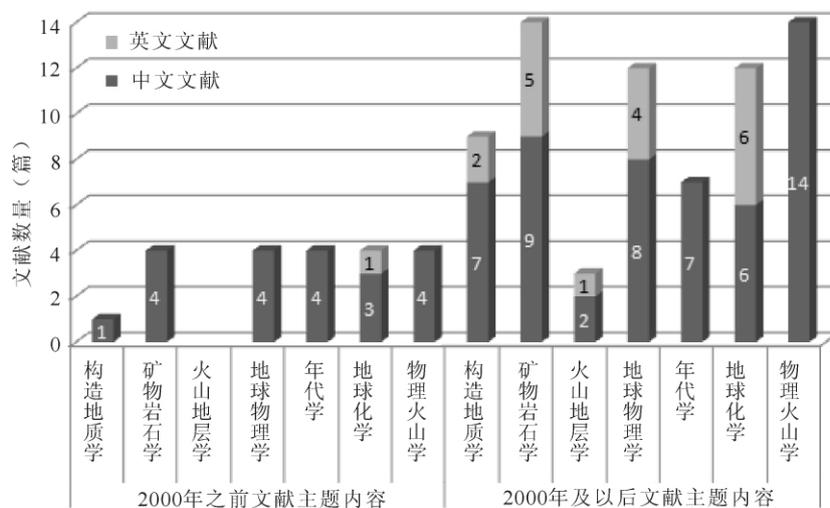


图 1 迄今有关长白山火山研究的中外文献分析柱状图

Fig. 1 Histogram for analysis of Chinese and English literatures published on Changbaishan up to now

制板等,是构成火山体的基本素材,是在标本和剖面尺度研究火山及地质填图的前提和基础。如同各种建筑材料通过四梁八柱构建起房子来一样,火山喷出物是按照自身特定的堆积单元(火山地层)和叠置关系(火山架构)建造起巍峨壮丽的火山景观的。火山地层学、火山架构、物理火山学涵盖了火山喷出物如何堆积成火山、成山过程及其机理的基本概念。早在 19 世纪中叶,人们就开始意识到火山物质的堆积方式,即火山地层有别于沉积地层。其主要表现为两个方面:首先,火山物质源于地下,可穿切先期

地层;第二,原生火山物质的搬运和分散方式有熔浆流及岩脉、火山碎屑流、涌浪和空落堆积,其从源到汇(from source to sink)的关系主要受喷发方式(岩浆物理化学性质和喷发规模及能量的综合表现)、地形及风向等因素的影响,而与基准面(base level)变化无关,但它们的再搬运过程往往受基准面变化的影响。值得注意的是,上述概念在近年中外地学文献的代表性论著中频繁出现,凸显出它们在认知火山过程中的重要性。笔者根据相关文献中这些概念的涵义并结合自身的工作体会,归纳总结见表 1。

表 1 本文涉及的表征火山物质运移和堆积过程及其特点的相关概念

Table 1 The definition in the article related the translation, accumulation process and characterization of volcanic material

概念	定义	参考文献
火山地层学 (volcanostratigraphy)	是地层学的一个分支学科,旨在对火山堆积体进行分解描述和整体认知;基于喷出物的内在属性和表观特征把火山堆积体划分成可辨别的、实用的和可填图的火山地层单元;根据火山堆积体的物质组成及其相互关系,阐明构成火山的喷出物类型、充填单元、界面属性和叠置关系,建立一系列可鉴别和对比的地层序列;通过对火山地层单元的描述、分类、命名和对比,建立起它们的空间关系和时代序列	[9-10]
火山架构 (volcanic architecture)	指火山地貌、内部建造和地下结构三要素及其组合关系。火山地貌如熔岩台地、火山盾、火山锥、火山垣、玛尔湖、火山口和破火山口等;内部建造指岩相单元(爆发、溢流和侵入等原始喷发相以及再搬运和火山沉积相)及其堆积方式(层/楔状、块/窝状、脉/席状等)和叠置关系(披盖、交切,整合、不整合等);地下结构包括火山颈、火山通道和供给岩墙等。三要素就是从上、中、下 3 个侧面表征火山堆积体目前的基本状态;火山建造-改造过程就是火山物质的产生、搬运和堆积的过程,表现为三要素之间的动态作用关系,火山地貌是结果、内部建造是过程、地下结构是原因	[10-12]
物理火山学 (physical volcanology)	火山学的分支科学,旨在研究火山作用的物理过程和火山现象的物理刻画与解译。前者主要包括构造应力场和构造发育史,地下岩浆物理属性和供给速率与地表喷发类型及火山地形的关系,浅层构造和火山架构与深部岩浆囊的耦合关系等。后者主要指火山形态学、火山物质的流变学和运动学与搬运动力学;火山口规模与喷发物总体积的关系;岩浆溢出速率-空落沉积物体积-喷发烟云柱高度-持续时间等属性与总喷发量-爆发性指数等诸参数之间的相互关系	[9,13-18]
火山学 (volcanology)	起初是一个描述性学科,主要涉及火山地貌的地形学、火山地区的地理学和喷发年代学等 3 方面;进而涉及火山活动的物理过程;目前火山学侧重岩浆成因、浅层侵入和岩浆喷发的地表过程,即涉及到火山作用及其起因和所造成的结果或现象	[9,19]
火山通道构造 (diatreme structure)	边缘相对陡峭(典型为锥形)且规则的构造,侧向被围岩或沉积物所围限,纵向从同喷发期火山口的地表向下延伸到供给岩墙。在这里火山物质通过火山管道(conduit)向上运移到达火山喷口(vent)。通道构造的底部常存在形态不规则的杂乱带,即所谓的根部带(root zone),由黏滞流熔岩、火山碎屑和围岩角砾岩构成	[20]
火山口(crater),火山喷口 (vent)和破火山口(caldera)	火山口指在火山锥顶部盆地状的环形构造,其底部大体相当于喷口(火山物质由此处泻出到地表)所在位置,其形状有碟形、碗形或漏斗状。破火山口规模较大,直径常大于 3 km,为火山口经进一步塌陷、侵蚀或爆破,口径扩大而形成	[10,20]

表 1(续)

概念	定义	参考文献
火山爆炸性指数 (volcanic explosivity index, VEI), 破坏性指数 (destructiveness index, DI), 喷发强度 (intensity), 喷发量级 (magnitude)	VEI 用于描述爆炸式喷发火山规模, 主要基于喷发物质量或沉积物体积(表 2)。DI 指被熔岩流、火山碎屑流和涌浪所覆盖面积的对数值, 或者, 一期喷发所产生的火山碎屑大于 100 kg/m <sup>2</sup> 所覆盖的面积。喷发强度就是质量喷发速率(kg/s), 强度等级用质量喷发速率的对数表示。喷发量级指一期火山喷发所产生的喷发物质量(kg), 量级等级用喷发物质量的对数表示	[21]
中性浮力面 (neutral buoyancy level)	指某一体系中的一定高度, 在该高度位置, 体系与周围环境介质的密度相等。多源火山通常被认为在中浮面上有一岩浆储集囊。岩浆上升进入该囊主要靠正向浮力(亦可有构造应力推动)。对于喷发至空中的烟云柱(volcanic plume)而言, 中浮面就是蘑菇云(或雨伞区)下部的平面; 该面之下为对流相, 之上为重力流扩散相	[22-23]
火山或岩浆系统 (volcanic or magmatic system)	由①岩浆源中的熔融异常、②岩浆上升到地表的通道、③岩浆囊、④侵入体、⑤地热异常带、⑥火山体本身, 六要素构成的从岩浆发生到火山形成的整个体系。气体出溶等岩浆囊中的过程调节着岩浆的产率	[22]

表 2 火山爆炸性指标<sup>[21]</sup>Table 2 The volcanic explosiveness index<sup>[21]</sup>

爆炸性指数	一般性描述	定性描述	喷发的火山碎屑体积最大值/m <sup>3</sup>	喷发烟云柱高度/km
0	非爆炸性的	缓慢	10 <sup>4</sup>	<0.1
1	小	溢流	10 <sup>6</sup>	0.1~1
2	中等	爆发	10 <sup>7</sup>	1~5
3	中一大	爆发	10 <sup>8</sup>	3~15
4	大	洪泛性的, 突发性的	10 <sup>9</sup>	10~25
5	很大	洪泛性的, 突发性的	10 <sup>10</sup>	>25
6	很大	洪泛性的, 突发性的	10 <sup>11</sup>	>25
7	很大	洪泛性的, 突发性的	10 <sup>12</sup>	>25
8	很大	洪泛性的, 突发性的	10 <sup>13</sup>	>25

注: 爆炸性指数亦称爆发指数<sup>[10]</sup>, 其隐含意思是喷发量级与喷发强度之间存在某种相关性, 只用其中的一个指标即可描述喷发规模; 但在许多研究实例中二者并不存在简单关系, 因此需要对量级和强度分别加以描述。喷发量级 =  $\log_{10}$  喷发质量 - 7, 喷发质量单位为 kg, 由此算出的喷发量级近似等于爆炸性指数 VEI。喷发强度 =  $\log_{10}$  喷发速率 + 3, 喷发速率单位为 kg/s, 以此式算得最强烈喷发的强度为 10~12, 而很缓慢喷发的强度为 4~5; 现代和古代的火山喷发都可用上述两式进行描述。长白山天池火山千年大爆发, 其喷发物约为  $2.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ <sup>[24]</sup>, 估算爆炸性指数大于 5。

## 2 长白山火山喷出物分类及分布特点

长白山区的火山活动经历了造盾、造锥和碱流质火山碎屑等喷发阶段<sup>[18]</sup>, 起始于早中新世, 一直延续到现代, 时限近 24 Ma<sup>[25]</sup>。其喷出物类型多

样, 不同活动期喷出物特点差别较大: 造盾期以洪泛玄武岩为主, 造锥期常见柱状节理中基性和碱性火山岩, 火山碎屑喷发期多为浮岩、火山渣和火山灰。依据长白山区野外调查结果, 结合相关文献, 笔者提出本区火山喷出物分类初步方案(表 3)。考虑到长白山主峰及其周围火山碎屑物分布广泛, 因此提出火山碎屑组分三端元分类的参考方案(图 2)。以长白山天池为中心, 笔者在半径 90 km 范围内对火山喷出物分布情况进行野外地质调查(图 3), 发现不同类型喷出物搬运距离不同, 大致呈现围绕天池火山口环带状分布的特点。例如: 天池破火山口边缘的火山垣主要为深灰色不规则柱状节理熔岩、灰白色火山碎屑流与火山碎屑涌浪沉积、深灰色岩块滑坡-崩落堆积(图 3 中考察点 5); 而在距天池 15 km 左右锦江大峡谷则主要为喷气孔构造十分发育的火山碎屑流沉积(图 3 中考察点 8); 位于天池 20~25 km 的东南坡(图 3 中考察点 4)和西北坡(图 3 中考察点 9 和 10), 主要发育火山泥石流沉积, 且坡度越陡(见图中等高线)、距火山口越近, 粒度越粗、单层厚度越大、成层性越差(图 3 中考察点 4, 图版 A); 而缓坡、距火山口较远区的火山泥石流沉积, 粒度细、层薄、成层性好(图 3 中考察点 9 和 10, 图版 B)。长白山天池火山喷出物的分布特点与 Einsele<sup>[26]</sup>总结的世界典型火山相比(图 4), 具有总体趋势上的一致性。

表 3 长白山火山喷出物(火山作用产物)分类  
Table 3 Classification of volcanic materials ejected in the Changbaishan areas

分类依据	主要类型	参考文献
碎屑来源	新生碎屑(juvenile fragments),火山喷发期形成的 同源碎屑(cognate fragments),早期喷发物再破碎 附生碎屑(accidental fragments),下伏地层围岩或捕获的非火山物	[26]
碎屑粒径	集块和火山弹(blocks and bombs),粒径≥64 mm 火山砾(lapilli),粒径 2~64 mm 火山灰(volcanic ash),粒径≤2 mm(其中≤0.063 mm 为火山尘(dust))	[26-27]
化学成分	拉班玄武岩,玄武质安山岩,安山岩,流纹岩,英安岩,碱性玄武岩,粗面玄武岩,玄武质粗安岩,粗面安山岩,粗面岩,碱流岩	[18,28]
成岩方式和岩相	火山熔岩:洪泛玄武岩或大型黏滞流熔岩,柱状节理熔岩,枕状熔岩,块状熔岩,绳状熔岩,涌浪状熔岩,脉岩,玻璃质熔岩(黑耀岩、珍珠岩、松脂岩);碎屑熔岩:渣状熔岩,熔岩滴锥,堆砌角砾/集块岩,熔结角砾岩,隐爆角砾岩,构造角砾岩;火山碎屑(岩):火山碎屑空落堆积(空落火山灰、浮岩、火山渣),火山碎屑流(火山渣流、浮岩流、集块—灰流),火山碎屑涌浪沉积(灰云浪、基浪、底浪),火山泥石流(单成分、复成分),滑坡—崩落堆积;沉火山碎屑堆积	[29-31]

注:每种喷出物或火山作用产物的特征与识别标志详见相关参考文献。

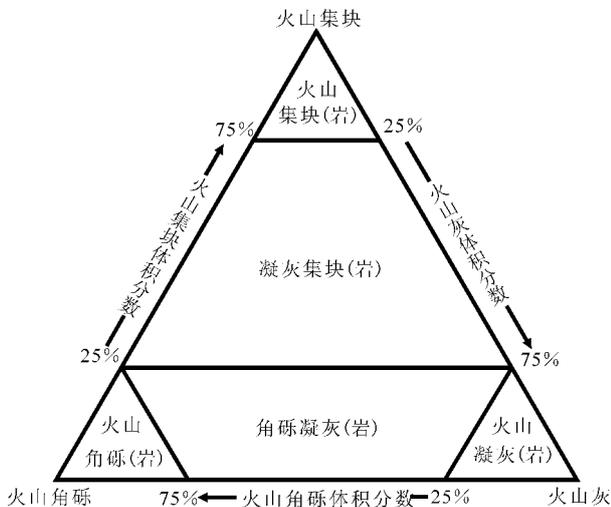


图 2 火山碎屑组分三端元分类图(据文献[27]修编)

Fig. 2 Grain-size ternary diagram for naming primary volcanoclastic rocks (modified from reference [27])

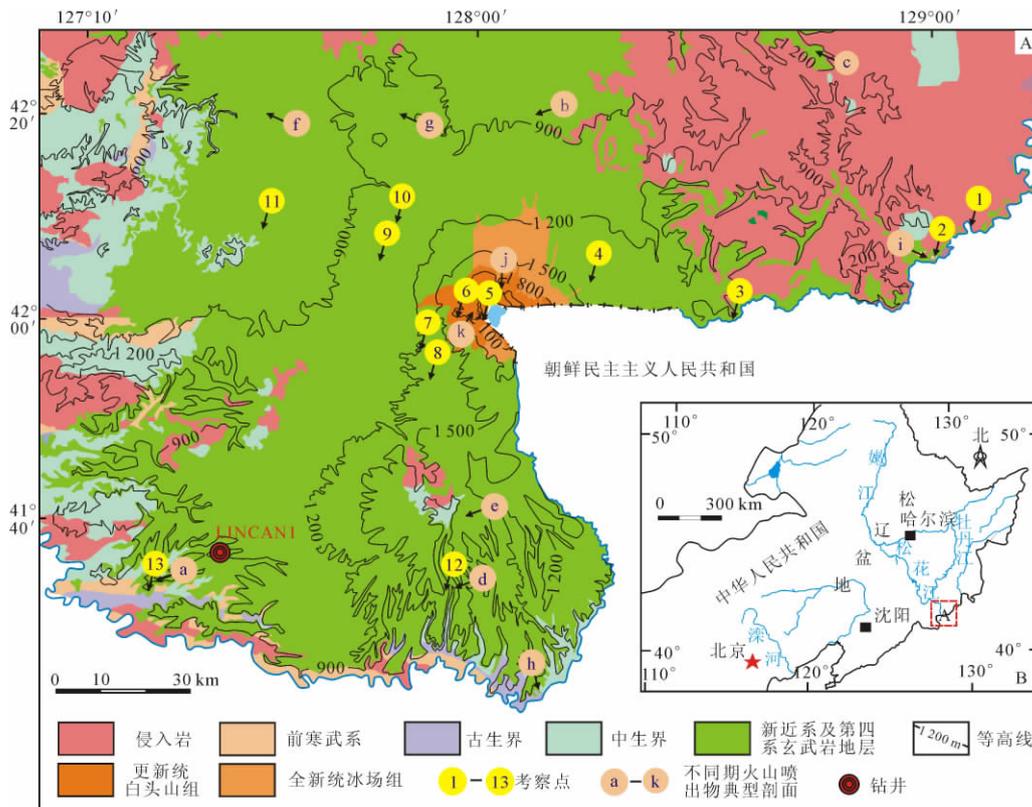
### 3 长白山地区火山地层学

笔者和团队成员于 2007、2008、2009 和 2012 年先后 4 次对长白山地区针对火山地层和火山架构进行地质考察和剖面测量,以期获取较为完善的关于该区火山地层和火山架构的第一手资料。但由于剖面出露情况和野外工作程度等主客观条件约束,相

关工作还只能认为是刚刚起步。现将已有资料和认识进行归纳总结,作为本区火山地层和火山架构的初步成果与同行共享,以期今后在该领域进行持续和深入的探索起到抛砖引玉的作用。研究资料证实,详细的火山地层重建是获得火山活动灾害可靠评价的第一步<sup>[32]</sup>。要想表征某次未来喷发的可能场景,就必须首先认知过去喷发的相关喷出物及其全部分散模式。只有这样,才能够预测未来喷发、搬运的动力学机制和潜在危险。然而,在源于同一火山口的多期喷发区,地层准确对比是相当困难的,因为那里的喷发序列表现为由许多薄层构成的复杂地层。对于近源剖面而言,因其地层记录保留完整,故用经典沉积学和地球化学方法通常可以确定喷发序列;但在距喷发源较远的地区,由于地层记录不连续且往往缺乏标志层,因此地层对比很困难;在相似的岩性不同的层序中反复出现,而这些岩性层的精确地层位置又不十分清楚的情况下尤为如此。

#### 3.1 火山地层单元

长白山地区的火山喷发历时较长,喷发期次多,喷发中心不断迁移,喷发类型和喷发强度在不断变化,属于多期喷发形成的层状复合型火山<sup>[19]</sup>。由于其快速的建造隆升速率和丰富的水系导致喷发物不断被次生迁移改造和再沉积,形成一系列侵蚀面、风化壳和古土壤层。另外,本区植被发育,剖面出露局限。这些都使得本区火山地层研究难度大大增加。



关于 1—13 考察点的说明:考察点 1. 军舰山期玄武岩与花岗岩接触界限剖面,  $N42^{\circ}5'32.88''$ ,  $E128^{\circ}59'15.54''$ ;考察点 2. 军舰山玄武岩,  $E42^{\circ}6'4.6''$ ,  $N128^{\circ}59'44.12''$ ;考察点 3. 玄武岩路边剖面,  $N41^{\circ}59'58.34''$ ,  $E128^{\circ}33'39.89''$ ;考察点 4. 火山泥石流路边剖面,  $N42^{\circ}3'37.85''$ ,  $E128^{\circ}15'37.26''$ ;考察点 5. 长白山西坡山顶火山碎屑锥,  $N41^{\circ}59'47.63''$ ,  $E28^{\circ}1'45.85''$ ;考察点 6. 梯子河粗安岩,  $N41^{\circ}56'49.92''$ ,  $E127^{\circ}58'48.51''$ ;考察点 7. 锦江大峡谷火山碎屑流,  $N41^{\circ}53'52.1''$ ,  $E127^{\circ}54'53.51''$ ;考察点 8. 王池火山口湖,  $N41^{\circ}56'34.87''$ ,  $E127^{\circ}54'22.94''$ ;考察点 9. 采石场火山泥石流及硅化木,  $N42^{\circ}5'32.38''$ ,  $E127^{\circ}47'30.29''$ ;考察点 10. 槽子河林场火山泥石流,  $N42^{\circ}9'6.39''$ ,  $E127^{\circ}49'49.13''$ ;考察点 11. 松江河采石场安山岩、玄武岩及火山碎屑岩,  $N42^{\circ}8'42.84''$ ,  $E127^{\circ}32'52.43''$ ;考察点 12. 十五道沟望天鹅玄武岩剖面,  $N41^{\circ}34'5.32''$ ,  $E127^{\circ}56'41.07''$ ;考察点 13. 八道沟马鞍山组玄武岩及陆源碎屑岩剖面,  $N41^{\circ}32'36.73''$ ,  $E127^{\circ}18'14.07''$ 。长白山地区新生代火山喷发物从老到新共分为 15 期<sup>[29]</sup>:1. 马鞍山期玄武岩( $\beta E_3-\beta N_1 m$ ), 分布于三道白河北东向断裂带上, 典型剖面八道沟镇北马鞍山 a,  $N41^{\circ}32'37''$ ,  $E127^{\circ}18'14''$ ;2. 奶头山期玄武岩( $\beta N_1 n$ ), 根据不同地点可分别命名为奶头山、甄峰山、长白玄武岩, 奶头山玄武岩分布在天池锥体东侧, 典型剖面在奶头山 b,  $N41^{\circ}20'0''$ ,  $E127^{\circ}7'50''$ , 甄峰山玄武岩典型剖面在和龙市南岗山脉甄峰山 c,  $N42^{\circ}25'50''$ ,  $E128^{\circ}44'35''$ , 长白玄武岩分布于长白县境内, 典型剖面位于十五道沟五号作业点;3. 望天鹅期玄武岩( $\beta N_1 w$ ), 分布于望天鹅破火山口周围, 典型剖面位于十五道沟 d,  $N41^{\circ}33'5''$ ,  $E127^{\circ}57'50''$ ;4. 红头山期安粗岩-碱流岩( $\tau N_{1-2} h$ ), 分布于望天鹅破火山口东侧红头山周围, 典型剖面见于十九道沟上游公路 e,  $N41^{\circ}40'5''$ ,  $E127^{\circ}59'15''$ ;5. 泉阳期玄武岩( $\beta N_2 q$ ), 分布于泉阳镇、新屯子等地 f,  $N42^{\circ}20'0''$ ,  $E127^{\circ}33'10''$ ;6. 头西期安粗岩-碱流岩( $\tau N_2 t$ ), 分布于抚松县与安图县交界处头西自然保护区至东、西土顶子等地 g,  $N42^{\circ}20'0''$ ,  $E127^{\circ}50'25''$ , 出露不佳;7. 沿江村期玄武岩( $\beta N_2 y$ ), 分布于长白县鸭绿江北岸, 代表剖面见于沿江村东山 h,  $N41^{\circ}23'20''$ ,  $E128^{\circ}8'35''$ ;8. 军舰山期玄武岩( $\beta N_2 j$ ), 广泛分布于天池周围和图们江沟谷, 典型剖面在和龙市崇善镇北军舰山 i,  $N42^{\circ}6'0''$ ,  $E128^{\circ}59'20''$ ;9. 白山期玄武岩( $\beta Q_1 b$ ), 按地区命名为白山玄武岩、灵光塔玄武岩、图们江玄武岩, 白山玄武岩分布于长白山天池周围, 典型剖面位于天池南鸭绿江上游白山林场附近, 灵光塔玄武岩典型剖面在鸭绿江北岸沿江煤矿村, 图们江玄武岩分布于图们江沟谷上游;10. 白头山期碱性粗面岩( $\tau Q_{1-2} b$ ), 围绕天池呈椭圆形分布 j,  $N42^{\circ}2'55''$ ,  $E128^{\circ}3'5''$ ;11. 广平期玄武岩( $\beta Q_3 g$ ), 分布于图们江上游二级阶地河谷, 代表剖面在和龙崇善红旗桥头北;12. 气象站期碱流岩( $\tau Q_3 q$ ), 分布于天文峰北气象站火山口北侧 j;13. 冰场期熔结凝灰岩及火山灰( $\tau Q_1 i$ ), 分布于天池北冰场及白山桥等地;14. 白云峰期碱流质浮岩及火山灰( $\tau Q_1 i$ ), 该期喷发物下部灰白色浮岩见于和平营子和园池西, 中部暗棕色火山灰见于二道白河附近, 上部灰色、灰白色和蛋黄色浮岩分布较广, 天池周边山峰厚度大, 园池、广平、松江等地较薄;15. 八卦庙期熔结凝灰岩及火山灰( $\tau Q_1 i$ ), 上段有两种分布形态, 一是在天池周边或沟谷呈盾状锥体分布, 北部以八卦庙盾状火山锥为代表, 南部以南沟火山锥为代表 k,  $N42^{\circ}0'30''$ ,  $E128^{\circ}0'0''$ , 二是呈席状、岩被状覆盖在山火山岭上, 分布面积广, 厚度薄而稳定, 下段以天池南为中心向东广泛分布。

图 3 长白山地区地理位置及火山喷出物分布图

Fig. 3 The location of Changbaishan and the distribution of the eruptive material

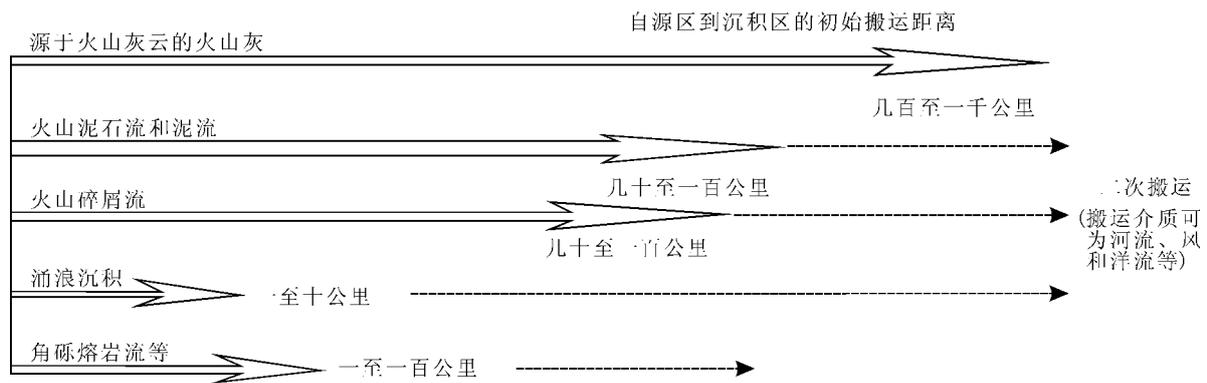


图 4 不同火山喷出物的初始搬运距离及其分布特点(据文献[26]修编)

Fig. 4 Common ranges of primary transport distances of various tephra(modified from the reference[26])

目前本区火山地层的研究精度还无法满足火山喷发历史再造和灾害预测评价以及未来喷发模拟的实际需求。根据长白山地区火山喷发和喷出物保存与改造特点,笔者提出本区火山地层单元划分的初步方案(表 4)。表中对长白山地区广泛发育的地层单元(如柱状节理熔岩、火山泥石流沉积等)给予详细刻画,对于较为少见的岩相类型(如块状熔岩等)

也给出分类位置并简要描述。需要说明的是:表 4 中的 20 种地层单元之间有时是相互依存、共同构成同一充填单元(如柱状节理熔岩表面可见绳状熔岩);还可能是一种地层单元中包含几种其他类型的单元(如洪泛玄武岩层可能包含熔岩滴、渣状熔岩及柱状节理熔岩等)。另外,玻璃质熔岩和熔结结构熔岩,可能会出现在多种充填单元中。

表 4 火山地层单元及其充填特征分类

Table 4 Volcanostratigraphic units and their accumulation features in Changbaishan volcanos

岩性	地层单元	岩相、产状和成因
火山熔岩(熔岩基质中分布的火山碎屑体积分数 < 10%, 凝固结)	洪泛玄武岩或大型黏滞流熔岩	从基性到酸性的层状溢流相熔岩,是构成大型火山岩台地的主体,陆上和水下均可形成。中厚层状,单层厚几米到近百米,分布面积广。斑状结构,常见气孔杏仁体、流动构造和垂向分带性;气孔杏仁具拉长定向,常于岩层的上下多、中间少或无;属低纵横比的非渠道型被状熔岩流,常见于喷发旋回的早中期。气孔是岩浆流动冷却过程中圈闭的气泡,上部气孔多是重力分异的结果,下部有气孔是岩浆前缘履带式前进将顶部岩浆轧到下边所致。与枕状熔岩相比其岩浆流速和温度较高
	柱状节理熔岩	玄武岩常见,亦见中酸性和碱性岩,多为侵出相或近源厚层溢流相,是构成火山岩盾的主体,陆上和水下均可形成。单个柱体多边形(四到六边形为主),规则或不规则,近直立、弯曲至平卧,纵向上具 3 层结构:自下而上为柱廊(下部厚的规则层)—柱楣(中部薄的较不规则过渡层)—顶廊(不规则较厚顶层)。横向上岩体直径几十米到千余米,厚十几米到百余米。岩石多呈致密块状,有时含气孔杏仁体,火山熔岩结构,可见流动构造,流纹理方向多与柱体长轴垂直,可见柱面横纹。为高纵横比的巨厚岩浆流或岩浆湖冷凝收缩形成,柱体长轴垂直于冷凝等温面;单个冷凝单元的冷凝时间长达几年到几十年;冷凝作用从顶、底及边缘向内推进,柱面横纹被认为是冷凝前缘逐一推进(液态向固态突变)的记录
	枕状熔岩	玄武岩及安山岩常见,亦有流纹岩,高黏度岩浆于深水下的溢流相。鉴别标志:①呈岩球和岩枕堆积而成的舌状体;②岩枕边缘见玻璃质淬火边和收缩缝、内部可见气孔;③岩枕间普遍发育水成火山碎屑。成因为熔岩流表面因水冷而固结,岩浆内压力使表面破裂,沿裂缝渗出新岩浆,如此周而复始岩浆向前和向上运移
	块状熔岩	见于中基性、酸性和碱性岩,属中高黏度岩浆陆上溢流相。为锯齿状岩块堆积体,成分单一,无细粒基质充填,单个岩块直径十几厘米到几米;多见于中小规模火山喷发旋回的顶部和边部;常与不规则柱状节理、绳状和渣状熔岩共生。为熔岩管塌陷、长形压拱和坟状火山包冷凝收缩形成

表4(续)

岩性	地层单元	岩相、产状和成因
绳状熔岩		见于玄武岩,属极低黏度岩浆陆上溢流相。表面光亮,呈绳状、纤维状、麻花状、爬虫状、皱纹状;其长轴垂直流向或凸向下游。常构成涌浪状熔岩的表层,内部发育平滑规则状气孔;其壳层之下可见洞穴(先前的熔岩管道);发育于玄武岩旋回的早期。同一熔岩流顺流向可由绳状变为渣状
涌浪状熔岩		见于玄武岩,溢流相。波长和波高均在几十厘米到2 m的波状起伏形玄武岩-碎屑岩组合体,其表面常见大型多方向冷却收缩裂缝,将熔岩切成大块。与绳状及渣状和块状熔岩共生。为低黏度岩浆汹涌澎湃式的快速流动、同时履带式裹挟表层火山渣而成
脉岩		从酸性到基性都有,以中性居多,属火山口和近火山口区岩浆供给系统(次火山岩相)。厚几十厘米到10 m以上,形状规则或锯齿状,常发育追踪张剪性节理,产状陡倾;从岩脉与围岩的接触界面到中心具分带性,自外向内结晶程度变好,边缘可见流动构造
玻璃质熔岩		包括黑耀岩(含水质量分数<1%)、珍珠岩(含水质量分数3%~5%)和松脂岩(含水质量分数4%~10%);酸性为主(成分同流纹岩),也见中性和基性者,侵入相为主亦常见于溢流相熔岩流的顶、底和前缘。单层可达几十米,集中发育时多见于水下喷发或水中冷凝,且常呈凸起的岩穹和岩塔。为岩浆快速冷凝产物
火山碎屑熔岩 (熔岩基质中分布的火山碎屑体)	渣状熔岩	炉渣状的熔岩角砾集块集合体,中黏度岩浆陆上溢流相。内部有不规则状沿流向拉长的气孔,常见三明治构造(熔岩夹于熔结角砾岩之间),与绳状、块状熔岩共生,比绳状熔岩厚且流动慢,其单层2~3 m、最大可达20 m。成因为锯齿状熔岩流前缘,通过前缘变陡-碎裂的方式履带式蠕动前进而形成
积分数>10%, 冷凝固结)	熔岩滴锥	热熔滴回落,并围绕火山口堆砌成锥形,属低黏度岩浆陆上爆炸式喷发产物。常见于喷发旋回早期。被抛出碎屑物形状源于其低黏度。若弹道短则平摊状落地呈熔岩“包”(亦称牛粪状火山弹);若弹道长则拉成固结的熔岩条带(称带状火山弹)。夏威夷式喷发的大型岩浆喷泉可将熔岩滴抛到空中数百米,每个熔滴后面都有个拖曳熔岩流尾巴,它们冷凝固结成称之为火山丝和火山泪的线状火山玻璃
	堆砌角砾岩	见于火山口内侧(火山颈相),一种以堆砌结构(貌似混凝土)为标志性特征的火山角砾岩和集块岩。以同源火山碎屑为主,包括同期浆屑、岩屑和先期岩屑及少量非火山围岩碎屑(体积分数通常小于5%),棱角状、无分选,岩体呈团窝充填状(无层)或回填状,起胶结作用的物质是细粒基质和(或)熔浆冷凝物。为火山垣陡坡垮塌堆积物与后续喷出物的混合体被细粒凝灰质及熔浆经冷凝/压实胶结成岩或堆砌而成
	熔结结构 角砾/集 块熔岩	中酸性和碱性岩常见,为碎屑与熔浆共生的爆发相。含玻屑、浮岩砾、晶屑、岩屑和火山灰,具熔结结构、火焰石(扁平化的新生浆屑)、条纹斑状结构(片状玻屑所反映的面状页理)和流动褶皱。自中心到边缘可见3个带:强熔结→部分熔结→非熔结带;碎屑可见暗化边(氧化边)或浅化边(热基质使冷碎屑边缘重结晶)等环带结构;碎屑定向排列,其中塑性碎屑定向拉长,基质围绕颗粒塑变,基质及碎屑中常见(拉长定向的)气孔杏仁构造。为炽热塑性基质将灼热火山碎屑在载荷作用下烧结到一起而成;浆屑拉长和碎屑定向是压实和流动共同作用的结果;熔结强度主要受控于塑性基质黏度(成分和温度)和岩层静压力(厚度)及碎屑和挥发分含量,高温和低黏度岩浆利于形成强熔结结构;焊接起始温度600~750℃
	隐爆角砾岩	常见于以熔岩为主的火山机构中心部位,属火山通道相的组成部分。岩石由锯齿状原地角砾和岩汁(灌入流体析出物)两部分构成,其鉴定特征是隐爆角砾结构(枝杈状炸裂缝、原地角砾、岩汁胶结)。形成过程为富含挥发分的岩浆期后高压流体(岩汁)沿古火山通道(构造薄弱带)上升、隐伏炸裂、围岩碎裂、析出物使原地角砾胶结或部分胶结
	构造角砾岩	原地角砾、细碎屑胶结,多伴有绿泥石/绿帘石/绿磷石/绿纤石化等流体蚀变现象。属火山岩的构造改造岩,常见于火山机构中心部位。沿断裂带分布,呈几十厘米到几米厚的较规则条带状,侧向延伸几十米到数千米,常呈组出现。为构造应力将岩石张、剪、压碎成原地角砾(亦可有开启裂缝周缘的回填碎屑),其中较细碎及少量流体析出物将角砾胶结/部分胶结而成

表 4(续)

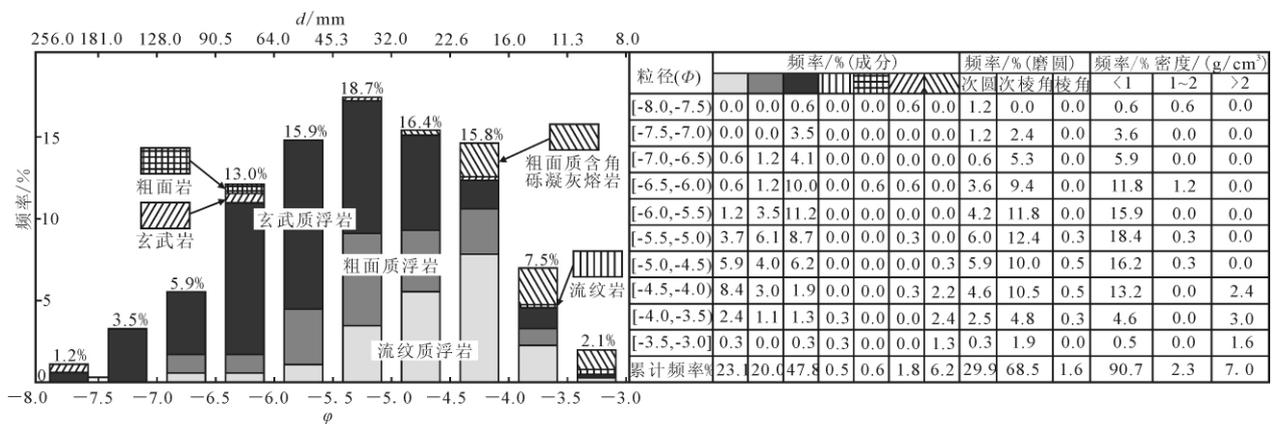
岩性	地层单元	岩相、产状和成因
火山碎屑堆积 (火山碎屑体积 分数>90%,压 实固结)	火山碎屑 空落沉积	包括空落火山灰、浮岩和火山渣,爆发相。可见于所有岩性和喷发类型,弹道状坠石(大头朝下、近 60° 入射角和砸坑)是空落沉积的标志性特征;岩浆蒸汽喷发产生的火山灰最多,且含增生火山砾。近火山 口粒粗(>64 mm),富含弹道状刚性集块和塑变火山弹,远离火山口粒度和厚度变小,空落火山渣和浮 岩远离火山口常过渡为火山灰沉积。多为厚层状、板状,粒序层理或块状,分选中等到好,常为低处和高 处近等厚的披盖式沉积。细粒者顺风而下,呈沿风向的单向分布。火山灰虽可远距离(>1 000 km)搬 运,但火山口附近最厚。湖相空落沉积可形成保存完好的纹层状韵律层理,其间可见粒序层理和坠石
	火山碎屑 流沉积	包括火山渣流、浮岩流和集块-灰流,爆发相。分选差或无分选,有时大颗粒浮岩显逆粒序,岩块正粒序, 但多不显粒序;于流动单元底部可见细粒底层,可见流动单元叠置层理、层内剪切扩散层理、喷气管和 炭化木;可与熔结凝灰岩互层。地形控制的填凹补齐式充填沉积。为含大量碎屑的高密度气-固热重力 流,沿底部流动;属层流或活塞流(状如消防水龙头),就位温度>300℃,搬运速率高达 100 m/s;搬运能 量源于喷发柱雪崩式垮塌和或高喷发速率。与常温下形成的碎屑流沉积的标志性区别是其强定向的高 热剩磁;与涌浪相比其分选差、块状,常显难辨的粒序性、线理或定向颗粒的叠瓦构造。长白山锦江大峡谷 多为火山碎屑流沉积
	火山碎屑 涌浪沉积	包括灰云浪、基浪和底浪,爆发相。多见于气水-岩浆相互作用式喷发,可与玛尔湖共生,火山口周围可 厚达百米,向外迅速减薄,通常单层厚<1 m,形成低处厚、高处薄的披盖式沉积,单向底形。发育低角 度交错层理、沙丘层理和爬升沙丘层理,缩胀构造、槽泊构造及炭化木、小型喷气管、低角度削截、U形侵 蚀渠,弹道状坠石-塑变砸坑、气体洞穴等构造。常为低于 100℃的冷湿黏流(水;岩浆比低的情况下为 干热流),为沿地表膨胀、涌动的低密度载屑蒸汽流(气-固两相),属扩散流;形成于爆炸冲击波、碎屑流 前锋和喷发柱垮塌,初始搬运速度可达 500 m/s。与火山碎屑流相比其层薄、粒细、分选好,且波状或交 错层理常见
	火山泥石 流 (lahar)	火山爆发相的组成单元或火山喷发间歇期形成。成分结构构造:典型成分为棱角状至次圆状的角砾、浮 岩块与火山灰级晶屑、岩屑混合物;碎屑粒度从凝灰到集块,变化很大,以粗粒为主,分选差;随搬运距离 增加大颗粒数量和粒径降低,而细粒组分不变;粒序性不显著,底部为几厘米的细粒层,之上的大颗粒略 显逆粒序,但只有浮岩碎屑多时才于流动单元顶部发育逆粒序,同层内可见正粒序和逆粒序;碎屑含量 低形成正粒序,碎屑含量高形成逆粒序;板状或长形碎屑平行流动面。发育不规则状气孔(圈闭的空气 泡或蒸汽所致),孔径主要为 1 mm 到 1 cm,于大颗粒或非渗透性碎屑层附近气孔变疏或加密。顶底面 和分布:底部通常无侵蚀,顶部平整或局部可见胀隆和凹陷。火山泥石流夹于各种成因的冲积扇、崩积 层、火山碎屑岩之间;沟谷上游薄、谷底厚,出口为舌状;厚度变化大,取决于下伏地形,多小于 5 m,最厚 可达 200 m;搬运距离多为 50 km 之内,最远超过 240 km。成因:lahar 为层流,属具有一定屈服强度的 非牛顿流体;漂砾在高强度基质中悬浮搬运;属水成火山碎屑流,水介质搬运,高黏度岩浆(中酸性、碱 性)的气水岩浆喷发,喷发物经过火山口湖,多与复合火山机构共生,碎屑物占流体质量 80%以上(80% 以下即为洪水碎屑流);碎屑涌流脉动式搬运,最终为一系列长短不一的舌状体的叠加;剩磁无定向;成 因按与火山喷发关系分 3 类:①直接的,即喷发物过水或落水(湖、雪、冰、雨)形成;②间接的,由地震或 火山膨胀引发的;③无关的,后期降雨/融水导致的火山碎屑物再搬运。单成分者直接源于火山喷发,复 成分者源于火山垣垮塌;含炭化木者源于炽热碎屑流、搬运中冷却演变为 lahar。与冲积扇泥石流沉积 的主要区别是层流、对底面无侵蚀(有时可见其下的草地保存完好)
	岩块滑 坡-崩落 堆积	多为火山喷发间歇期形成。顶部丘状、甬道状,平面扇状,剖面楔状,宽几米至百米,厚几米至几十米;棱 角状岩块简单堆积在一起,其间无充填物,表现为水体于岩块空隙间快速泻出的筛余沉积。或坐落于分 选很差的较细粒“基质”之中,从山坡到谷底基质分选性无规律性变化,其基质中泥质组分多于泥石流。 岩块滑坡受坡度、岩石破碎程度和重力控制,而崩落堆积为能干层与软弱层(如火山灰)互层,在洪水、地 震等触发下形成
	沉火山碎屑堆积(火山碎屑 体积分数为 90%~50%)	形成于火山喷发间歇期。非火山碎屑物体积分数<50%(大于 50%者为正常沉积物,按沉积岩进行分类), 主要包括火山碎屑残坡积、河湖相沉积和生物沉积(复成分砂砾、粉砂和泥质层,含炭屑凝灰质沉 积、含凝灰质硅藻土等)

### 3.2 火山碎屑堆积物类型、特征与分布规律

以长白山天池火山口为中心,对半径 30 km 范围内的火山碎屑物进行研究,识别出 3 种类型火山碎屑堆积,分别为火山碎屑流沉积、火山碎屑涌浪沉积和火山泥石流沉积。它们从天池火山中心向外表现出规律性分布特征。首先,构成天池火山垣的中心相带为火山碎屑涌浪及碎屑流沉积(观测点 5),表现为集块、角砾、浮岩渣、火山弹与火山灰的混合体(图版 C;图版 D),无分选、无磨圆,成层性差;与远离火山口的沉积物的最大差别是其碎屑气孔不发育,密度较大(密度 $\geq 2.5 \text{ g/cm}^3$ )的碎屑。随着离火山口距离的增加(15 km 左右,观测点 7),火山碎屑流沉积逐渐成为主体,其标志性特征为原地炭化木(图版 E)和普遍发育的大型喷气管构造(图版 F),可见大型似槽状的流动单元叠置层理,与火山垣处相比其成层性变好。最后,当距火山口 20 km 左右时,火山泥石流成为主体。笔者于长白山天池火山的西北坡和东南坡距火山口 18~25 km,发现 3 处出露较为完好的火山泥石流沉积剖面,并对此进行了剖面测量和碎屑颗粒的粒度、成分和密度统计。3 个剖面下部均未见底,顶部平整、植被发育、以木本植物为主,土壤层 30~50 cm,沉积物层面产状与山坡一致,倾角多小于 $5^\circ$ 。剖面可见厚度 10~15 m,侧向延伸稳定,剖面可见长度大于 1 km,单层厚度 0.2~5 m。在现今的较高海拔(1 200~1 500 m)和较近源的区域(观测点 4)单层厚度大( $>3 \text{ m}$ )、粒度较粗,碎屑以角砾、集块和火山弹为主,分选差,成层性差,粒序性不明显,但于浮岩块较为集中处见逆粒

序(图版 A)。而在现今的较低海拔(900~1 200 m)和较远源的区域(观测点 9 和 10)单层厚度较小(0.2~2 m)、粒度较细,碎屑以角砾和火山灰为主,分选性和成层性变好,且整个剖面显示出明显的向上变细、变薄序列,分选性向上变好(图版 B)。尽管 3 处火山泥石流露头的粗碎屑组分和序列特征有明显差别,但它们的细碎屑( $\leq 2 \text{ mm}$ )的成分和结构特征基本一致。

通过对考察点 4 处火山泥石流剖面随机选择 267 个颗粒( $d \geq 8 \text{ mm}$ ,  $d < 8 \text{ mm}$  当作基质处理)进行粒度统计发现(图 5),火山泥石流碎屑物的粒度分布为单峰式近正态分布,峰值为 $-5.5 < \Phi < -5$ ( $32 \text{ mm} < d < 45.3 \text{ mm}$ ),以角砾级碎屑为主。其碎屑物成分以玄武质浮岩、粗面质浮岩、流纹质浮岩为主(密度 $< 1 \text{ g/cm}^3$ ),含少量粗面质含角砾凝灰熔岩以及玄武岩、粗面岩和流纹岩(密度 $> 1 \text{ g/cm}^3$ )。不同成分的火山碎屑物粒度分布具有一定的分异性。其中:玄武质浮岩粒度最粗,峰值为 $-6 < \Phi < -5.5$ ( $45 \text{ mm} < d < 64 \text{ mm}$ ),为较粗的角砾级,其所含集块级碎屑也较多;而粗面质浮岩和流纹质浮岩粒度分布峰值依次减小,粒度多为中等和较细的角砾级,仅含有少量集块级碎屑;粗面质含角砾凝灰熔岩粒度最细,峰值为 $-4 < \Phi < -3.5$ ( $11.3 \text{ mm} < d < 16.5 \text{ mm}$ ),均为较细的角砾级碎屑,无集块级碎屑;其余的玄武岩、粗面岩、流纹岩碎屑较少,粒度分布规律性不强。火山泥石流的总体粒度分布特征,反映了其搬运距离较远,在重力分异作用下,相对容易搬运的小密度浮岩颗粒较为富集的特点。其不同成



$\Phi$  值 $> -3$ ( $d < 8 \text{ mm}$ )的颗粒为基质,占总体的 44%。

图 5 考察点 4 处火山泥石流粒度分布(左)及颗粒成分、磨圆和密度统计表(右)

Fig. 5 Grain size analysis of the lahar at outcrop 4(left) and the summary statistical results (right)

分碎屑粒度分布的分异性则可能与其碎屑物形成的先后顺序有关:流纹质浮岩可能为新生碎屑,爆炸性程度高,粒度较小;粗面质浮岩可能为同生碎屑,粒度相对较粗;玄武质浮岩可能为附生碎屑,粒度最粗。

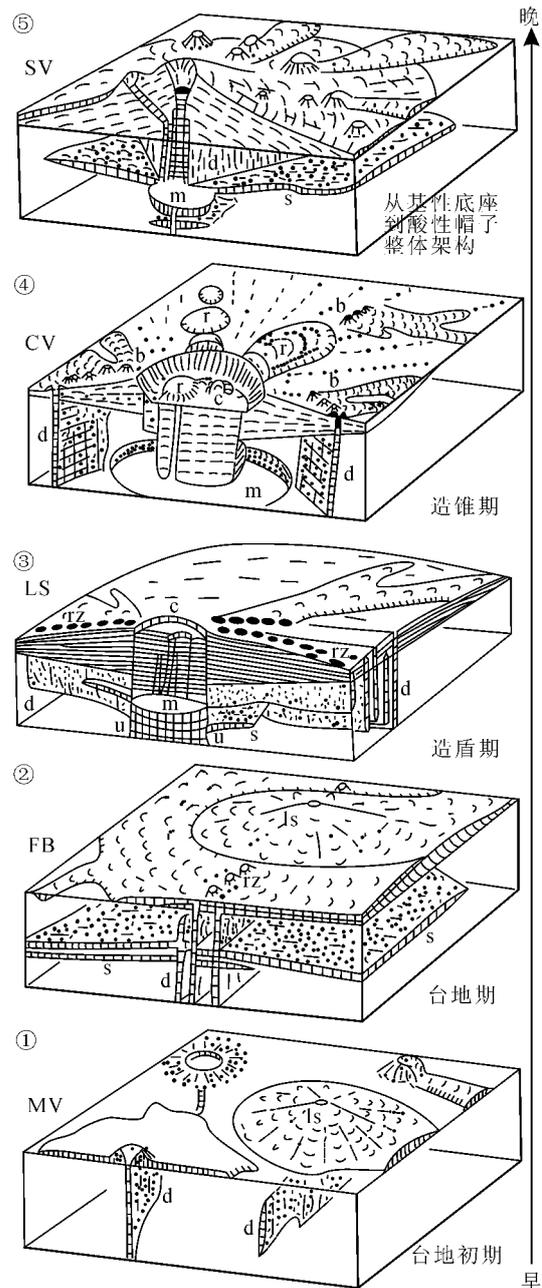
## 4 长白山地区火山架构

### 4.1 火山架构概述

长白山地区新生代火山岩以基性岩为主,后期有酸性和碱性岩浆喷发。Walker<sup>[22]</sup>将基性火山喷发分为单源(monogenetic)和多源(polygenetic)两种,前者只喷发一次就此消亡,后者反复喷发。多源火山具有充足而持续的岩浆供给速率,上升的岩浆熔体趋向于沿着先期岩浆开辟出的且仍旧热的通道向上运移。相反地,如果岩浆供给量小或者是阵发性的,先期岩浆通道已经冷却、对下一期岩浆熔体而言已不存在优势通道,则该火山就是单源的。火山喷发方式和火山类型就是单位时间岩浆供给速率与喷发频率 2 个因素相互作用的最终结果。而岩浆供给与火山喷发又是包括岩浆囊、输导系统、地表过程在内的整个火山系统在深部和地表的 2 种表现形式。火山架构就是基于地表和近地表可观测的火山属性,表征火山系统的深部作用-浅部响应关系。为揭示火山建造过程和便于从火山体构成的角度认知火山,通常可将基性火山喷发区的火山架构划分为 5 种类型:单源火山田(monogenetic volcano fields)、洪泛玄武岩田(flood basalt field)、熔岩盾火山(lava shield volcanos)、中心式火山(central volcanos)、层状复合火山(stratovolcanos)(图 6)。

单源火山田 由成群或零星出现的单元火山构成,每个火山只喷发一次。多数火山仅表现为一个火山渣锥,通常还有与之共生的熔岩;有些就是一个熔岩盾;还有些是环状凝灰岩垣或玛尔湖,其中心因岩浆蒸汽喷发而掏空(岩浆遇水爆炸),火山喷口位于水下或陆上低部位。一个典型的单元火山田通常包含 10~100 个火山,总体积约 10 km<sup>3</sup>,持续时间 50 ka~5 Ma。通过观察深度剥蚀的单源火山田可知,其根部的火山喷口为玄武岩塞子、岩墙或火山通道(充填有引爆角砾岩的垂直管道)。五大连池火山<sup>[33]</sup>主要表现为单源火山田特点,长白山火山玄武岩台地早期亦应属于单源火山田。

洪泛玄武岩田 由大喷发量广泛分布的熔岩流构成,这些熔岩来自星罗棋布的单源裂缝式火山喷



b. 玄武岩喷口(basaltic vents); c. 破火山口(caldera); d. 岩墙(dike); ls. 癣疥型熔岩盾(lava shield of scutulum type); m. 岩浆房(magma chamber); r. 流纹质熔岩穹丘(rhyolitic lava dome); rz. 裂谷带(rift zone); s. 岩床(sill); u. 超铁镁质岩(ultramafic rocks); MV. 单源火山田(monogenetic volcano fields); FB. 洪泛玄武岩田(flood basalt field); LS. 熔岩盾火山(lava shield volcanos); CV. 中心式火山(central volcanos); SV. 层状复合火山(stratovolcanos)。

图 6 与长白山可对比的火山架构演化趋势(据文献[21]修改)

Fig. 6 Evolution trend of volcanic architectures comparable with Changbaishan (based reference[21])

口。它们趋于覆盖喷发区的整个地表,并逐渐使地形变平缓,常见柱状节理。单个岩田面积  $3 \times 10^3 \sim 5 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。许多单个熔岩流的体积超过  $10 \text{ km}^3$ 。火山喷口表现为成排的火山口,由熔岩滴、熔结凝灰熔岩和火山渣构成。通常,裂隙式火山喷口会随着喷口附近围岩的熔蚀而逐渐扩大,喷口因袭夺而集中,并演化为若干点源式的火山喷口。许多熔岩流都是复合的,即它们可分为若干流动单元,每个单元都有自身的冷凝边缘,由此与其周围的熔岩相区别。绳状熔岩流的大量聚集可构成癣疥型熔岩盾,坡角通常  $1^\circ \sim 7^\circ$ 。洪泛玄武岩田可由若干相互叠置的低角度熔岩盾构成。许多这种复合熔岩会展现出内部的生长构造,其成因为新鲜岩浆注入到表层并使地表隆起,在岩浆从下伏壳层流出的地方形成熔岩管道。浅坡处的流动单元最厚,通常超过  $10 \text{ m}$ ,具气管构造(拉长的气孔)和离析体(圆柱形气孔和离析脉)。熔岩流入洼地可直接覆于湖沼相沉积之上(下伏为褐煤或泥岩层)。在剥蚀的洪泛玄武岩区,可见其岩层是向内倾斜的,因为在玄武岩堆积量最大的中心地带沉降量也最大。它们被线型岩墙群切割,这些岩墙群通常占岩石总体积的  $5\% \sim 20\%$ 。单个岩墙最窄,而岩墙群最密集的地方,往往在洪泛玄武岩田之上有个中心式火山的帽子。长白山十五道沟地区的柱状节理玄武岩发育区,山峦起伏、层层叠叠,内部生长构造(新生岩浆溢流口)常见,其特点属洪泛玄武岩田。

**熔岩盾火山** 主要由薄层熔岩流构成,火山碎屑层很少,常见绳状熔岩和渣状熔岩。该类火山的总体积可很大,裂隙式喷发为主,岩墙发育,破火山口周围的火山垣很陡,下伏可能有共生的辉长岩墙。其低角度盾状外形源于:①低的岩浆黏度,②高的溢流速率(驱使岩浆快速摊开、远离喷发源),③多数岩浆从侧翼裂缝溢出,而非最高处的主火山喷口,④作为隆起和喷发区的裂谷系统,会不断扩展(变宽)和沉降。长白山地区军舰山组等造盾型火山<sup>[34]</sup>多可归属于此类火山。

**中心式火山** 以酸性岩为主,亦有玄武质基性岩,双峰式常见,即酸性和基性多而中性少。该类火山的宽阔中心地带主要为酸性岩或只有流纹岩,其侧翼部位是洪泛玄武岩。通常可见多个流纹岩火山喷口。这些喷口趋于是单源的,因为流纹质喷发的间歇期比较长( $1 \sim 1000 \text{ ka}$ )。火山喷口带大致呈环形,通常直径  $10 \text{ km}$  左右,包围破火山口和破火

山口缘环。这个带可反映下伏的导致流纹质喷发的硅质岩浆囊的宽度,且在此区域内通常不会出现玄武质火山喷口。通常认为,在这个阴影区的玄武岩浆在向上运移过程中,由于其密度较大所以会被圈闭在酸性岩浆囊的底部,又因其温度较高故而对酸性岩浆起到加热作用;这样就会使酸性岩浆的黏度降低并促进其中气体的出溶,由此增加酸性岩浆的流动性,并触发火山喷发。有些地质现象可以很好诠释流纹质与玄武质岩浆的共生。例如:复合岩墙(外圈玄武岩、内部流纹岩)、条纹状混熔的熔结凝灰岩和熔岩、混浆岩。中心式火山通常具有一个或多个破火山口,它们发育在岩浆囊顶部的沉陷区,出现在大型硅质岩浆喷发期后,是由于部分岩浆被抽空所致。偶见一系列流纹质火山喷口沿弓形线分布的情况。在剥蚀的中心式火山区,通常发育花岗质深层岩(被认为是固结的岩浆囊)。环状侵入体和环形断裂描绘了状如大锅的火山输导体系,这是岩浆囊顶部发生活塞状沉陷所致,通常将这套组合称为环状杂岩体。长白山天池火山后期的全新世冰场组碱流质喷发,可以认为是建筑在玄武岩高原之上的酸性中心式火山。

**层状复合火山** 为爆炸式喷发的火山渣和火山灰与熔岩流互层。外形多为陡锥形,顶部常见安息角  $35^\circ$  左右的松散岩块,中心常为火山口湖。熔岩中斑晶发育,且均匀分布于岩石中(盾状熔岩中的斑晶通常呈分米级的窝状集中出现),于侧翼部多发育火山渣锥和寄生火山喷口。火山喷口的连线与喷发裂隙一致,这些线状裂缝呈放射状或相互平行。层状复合火山锥常因破火山口垮塌而遭削截,因此平面上呈不对称的马蹄状。长白山天池火山自玄武岩底座到碱流岩帽子,整体架构主要表现为层状复合火山的特点。

#### 4.2 长白山火山架构研究实例

研究火山架构的地上部分,目前主要是通过火山地层学方法,即重点刻画火山地层单元、界面属性和叠置关系三要素。长白山地区发育各种火山熔岩和角砾熔岩,类型多样,分布广泛,熔岩-角砾熔岩-火山碎屑岩组合成复杂多变的地层充填样式。笔者围绕长白山天池在  $90 \text{ km}$  半径范围内对火山熔岩类进行野外地质调查,发现柱状节理玄武岩是本区熔岩的主要地层单元类型。它们可以独立构成单成分熔岩丘或熔岩盾的主体(观测点 2、3、12),也可与角砾熔岩和火山碎屑物组合构成复合火山体(观测

点5、11、13)。需特别指出的是,在柱状节理玄武岩体的内部常可识别出代表内部生长构造的新生岩浆溢流口(图版G、H、I),说明它们是近源的,而且是多期喷发相互叠置而成的。柱状节理发育程度和形态多变,从直立到弯曲、平卧,构成千姿百态的地质景观。

#### 4.2.1 火山岩系下伏地层

长白山地区火山熔岩之下地层的时代跨度大,从寒武纪到中生代,岩性类型多,从沉积岩到岩浆岩均有出露。笔者在多处直接观测到火山熔岩的下伏地层及其与熔岩的接触关系,基本情况归纳如下:在八道沟剖面(观测点13)见到玄武质熔岩与下伏下奥陶统灰岩呈角度不整合直接接触,熔岩产状近水平,灰岩产状 $175^{\circ}\angle 65^{\circ}$ (图版J);在十五道沟(观测点12)见到柱状节理玄武岩与中—上侏罗统四道沟组熔结结构火山角砾熔岩直接接触,二者呈角度不整合(图版K);在军舰山(观测点2)和图们江沿岸(观测点1)见到柱状节理玄武岩与下伏海西期花岗岩不整合接触,二者之间发育2~7 m厚的复成分砂砾质松散沉积物(图版L)。

#### 4.2.2 火山地层界面类型与特征

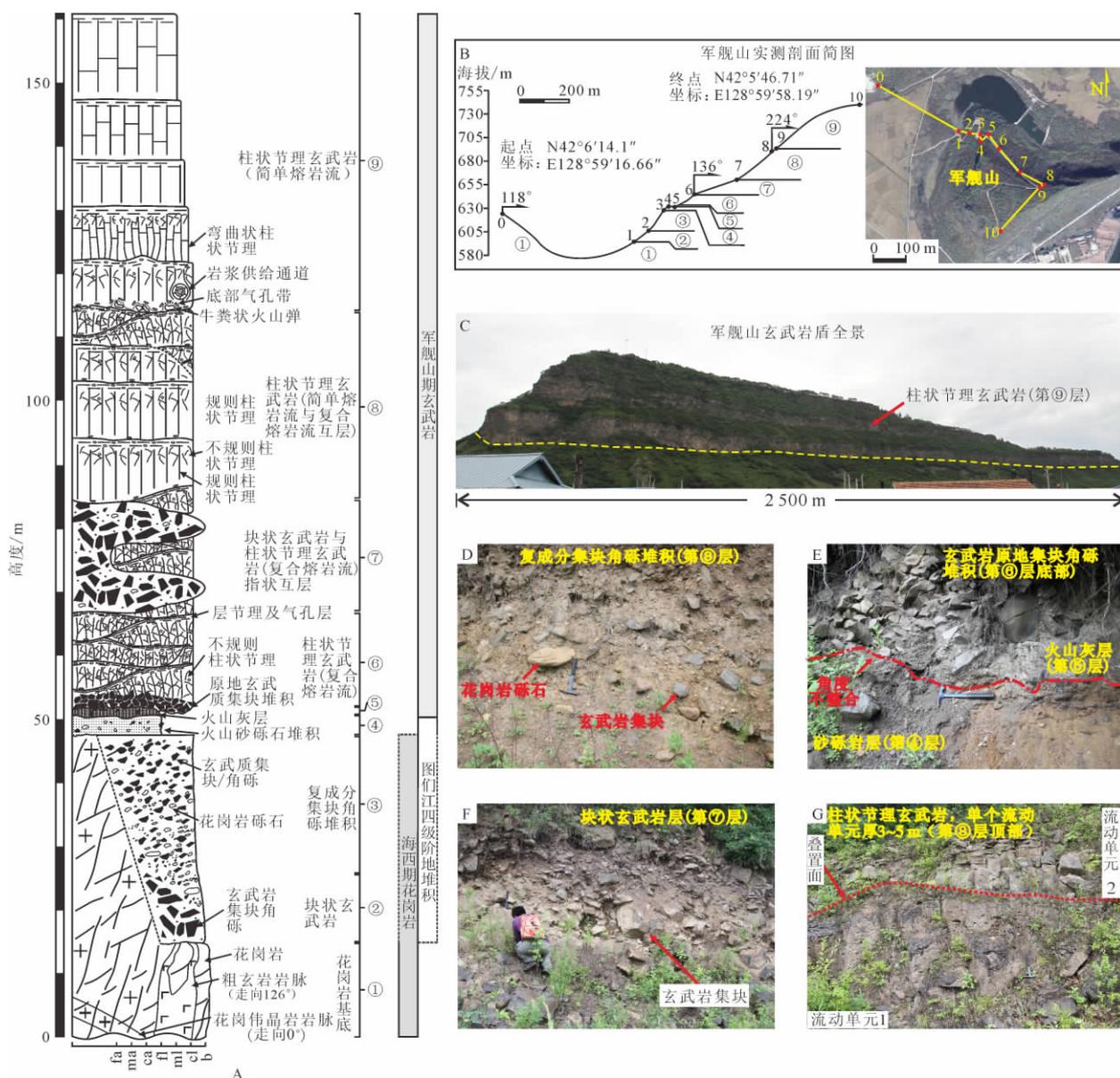
长白山火山地层界面包括新生代火山岩系与下伏地层的界面和火山岩系内部的界面两大类。前者已于前述,这里重点介绍后者。火山岩系内部界面又可分为岩性界面、岩相界面、喷发期次界面、冷凝单元界面等。岩性界面指不同岩性火山岩(包括熔岩与熔岩、熔岩与火山碎屑岩、火山碎屑岩与火山碎屑岩)之间的界面。岩相界面指溢流、爆发、侵出等不同岩相之间和空落火山碎屑、火山碎屑流和火山泥石流等不同亚相之间的界面。喷发期次界面指不同期次火山喷发物之间的界面,往往代表一定的时间间断,主要包括古土壤层、含非火山碎屑的沉积层(如军舰山剖面中3号层,八道沟马鞍山组玄武岩间的硅藻土等沉积层(图版M))、火山泥石流沉积的顶界面、岩块滑坡—崩落堆积的顶界面、熔岩风化壳等。另外,本区大套玄武岩之下往往发育一火山灰层,厚度几厘米至20 cm(如军舰山剖面中4号层),与下伏复成分砂砾层平行不整合、与上覆熔岩整合接触,它代表新一期火山活动的开始,也属于喷发期次界面。冷凝单元界面主要见于火山熔岩中,指上下的岩性和岩相相同、属同源同期火山喷发物,但二者之间因喷发先后不同而产生的冷凝界面。该界面主要见以下类型:①绳状、渣状、块状和涌浪状熔岩

的顶界面;②柱状节理熔岩序列中从柱体的规则(柱廊)和不规则(柱眉和柱顶)再到规则(下一个喷发单元开始),二者之间的界面(图版N);③代表内部生长构造的新生熔浆溢流口与被其推挤变形的先期熔岩的界面(图版G、H、I);④两个熔岩流之间的冷凝面和松散层(图版O)。

#### 4.2.3 火山地层单元及其叠置关系

火山地层单元指火山喷出物堆积序列中可识别的最小地层单位,通常相当于一种岩相或亚相,表现为某种岩性或具有密切成因联系的岩性组合;同一火山地层单元的上下需要有可识别的地层界面所围限。在同一种岩相或岩相的内部,若发育有明显的代表火山喷发期次或冷凝单元界面,则需要划分出不同的火山地层单元。例如:在大套的柱状节理玄武岩序列中,每一个不规则柱状节理玄武岩的顶面(称为柱顶),代表一个冷凝单元的结束;之上,再发育柱状节理玄武岩就要划分为另一个火山地层单元。火山地层单元在点剖面上重点研究其类型和垂向序列,在剖面对比中重点研究各个火山地层单元的形态和侧向变化,在火山架构研究中重点追索各个火山地层单元的三维分布和叠置关系。这样就可以通过点—线—面结合的方式,较为全面地揭示火山架构的特征及其构建过程。结合年代学和地球化学、地球物理探测等研究成果,可能在三维空间上揭示出从深部岩浆囊到地表火山地貌整个火山系统的发生、发展规律和演化趋势。同一火山地层单元内部,有时还可以进一步划分出不同的流动单元,它们往往是同一冷凝单元中熔岩流复合流动所致,即通常所说的简单熔岩流(冷凝单元即为一个流动单元)和复合熔岩流(冷凝单元由多个流动单元构成)。

长白山地区玄武质熔岩火山发育,而玄武质熔岩中又以柱状节理玄武岩最为常见。下面以军舰山剖面为例,探讨本区玄武质熔岩的火山地层单元和叠置关系(图7)。军舰山剖面柱状图见图7A,剖面简图见图7B,主体为上新世军舰山期玄武岩形成的大型洪泛玄武岩盾,角度不整合在海西期花岗岩(第①层)之上,其由块状玄武岩、洪泛玄武岩、柱状节理玄武岩等多个火山地层单元纵向叠置构成。最下部单元为块状玄武岩(第②层),向上变为复成分火山集块角砾堆积(第③层,图7D),并逐渐过渡为砂砾堆积(第④层,图7E)。在砂砾质堆积之上为军舰山洪泛玄武岩主体,两者间角度不整合接触,中间夹有薄层火山灰层(第⑤层,图7E)。洪泛玄武岩主体由柱



A 为柱状图, B 为剖面图和谷歌地球平面图(与图 3 点 2 对应), C—G 为典型照片。fa. 细粒火山灰(fine ash); ma. 中粒火山灰(middle ash); ca. 粗粒火山灰(coarse ash); fl. 细火山砾(fine lapilli); ml. 中粒火山砾(middle lapilli); cl. 粗火山砾(coarse lapilli); b. 火山集块(block)。

图 7 军舰山剖面玄武岩火山地层单元和火山架构

Fig. 7 Volcanostratigraphic units and volcanic architecture of the Junjianshan basalt

状节理玄武岩构成,按照冷却单元构成样式可大体分为 3 个性质相近的部分:最下部柱状节理玄武岩以多个薄层流动单元侧向叠加形成的复合熔岩流为主,并夹有指状穿切的块状玄武岩单元(第⑥、⑦层,图 7F);中部熔岩流流量加大,以简单熔岩流夹复合熔岩流为主(第⑧层,图 7G);顶部熔岩流流量继续增大,以多个冷却单元纵向叠置的简单熔岩流为主

(图 7C),在其内部可发育新生岩浆通道(第⑨层,图版 I)。不同冷却单元的熔岩流间发育凹凸不平的冷却面,冷却面表面可见牛粪状火山弹(图版 O)。

## 5 讨论

### 5.1 长白山天池火山地层与次生灾害

本区火山地层以涌浪、碎屑流和泥石流为主,密

度小于水的浮岩屑是其主要成分之一。火山泥石流按形成时间可分为同喷发期和喷发期后2种。从火山灾害的角度,二者的成因不同,灾害预防的考量要素也不同,因此,需要加以区分。尽管火山喷出物搬运与沉积情况变化很大,受到火山规模、喷发量级、岩浆类型、喷发中心周围的地表形态等因素的控制,但它们在盆地充填中的基本属性(序列和叠置关系等)是具有一定规律性的。因长白山天池的火山泥石流沉积的分布,受控于距火山口距离和地形坡度(再搬运则受水系控制),且在原生沉积的搬运距离范围之内(图4)。由此笔者初步认为,天池火山周围的火山泥石流沉积主要是原生的,即是在火山喷发期形成的,而非火山期后再搬运形成的。这对于评价天池火山的次生灾害是有价值的。因为据此可以认为天池火山在千年大喷发之后,没有发生过大规模的火山泥石流等导致喷出物短期、快速再搬运的改造事件。从目前火山泥石流堆积物的充填情况看,总体具有填凹补平、顶面平整、地层倾角普遍小于 $5^{\circ}$ 等特点,就位情况基本属于远小于安息角的稳定堆积状态,因此认为这些泥石流沉积出现大规模、快速、整体次生搬运的可能性不大。但仍需要特别指出的是,本区火山泥石流堆积物以浮岩碎屑为主,密度普遍小于 $1\text{ g/cm}^3$ (浮于水),只要出现局部为水所饱和的情况就必然会因层间剪切作用而导致大范围山体滑坡和次生泥石流灾害(洪水、快速融雪都会引发短期的火山堆积物浸水)。

## 5.2 长白山地区熔岩火山架构与次生灾害

熔岩火山遍及整个长白山地区,是最主要的火山景观之一。然而,本区火山熔岩架构的最明显特征之一,就是普遍建筑在前新生代刚性岩石之上,而在玄武质熔岩与下伏岩石之间,是一套 $3\sim 7\text{ m}$ 厚的复成分砂砾质、粉砂和泥质松散沉积物。这犹如建筑在软地基之上的摩天大厦,是非常不稳定的建筑结构,潜伏着巨大的地质灾害隐患。值得庆幸的是,从目前野外调查的初步结果看,多数火山熔岩架构之下的“软地基”(松散沉积层)的厚度,对于具体火山岩体而言比较均一,这就使得其上的大型熔岩体能够暂且安然矗立。但这实际上是一种亚稳定状态;因为只要由于某种原因致使“软地基”出现差异性压实或沉降,就会使其上的大型火山机构倾覆、蠕动、滑坡、大规模滑塌,乃至山崩。尤其是本区地形陡峭,河流密布,山体滑坡会阻塞河流,引发河流改道和局部大洪水。导致软地基差异升降、引发山体

滑坡的因素有突变和渐变两大类。突变因素主要是地震、火山作用等导致地应力骤变从而致使地表物质快速再分配的灾变性地质事件;它们目前尚难以预测和预防,且已超出本文涉及范围,此处不加论述。本区的渐变因素主要是指在地表水、地下水、地面径流和风及生物等营力的作用,“松软层”内的砂、砾、粉砂和泥质沉积物,因粒度、成分等物理化学性质的不同,而引起的物质差异性迁移(表现为层内流变作用),进而引发差异性升降,导致上覆岩体不稳定和滑坡、山崩。这些渐变因素作用的过程,具有从渐变到加速、再到突发的特点,即是从渐变到突变的。另一方面,它们又是可预测和可预防的。目前有效的预防措施是:首先要对道路、桥梁、河谷两侧等事关国计民生的重点区域进行火山架构调查,重点评估下伏“软地基”的稳定性和隐患所在,以便为此类灾害的防治提供科学依据,进而制定科学合理、长治久安的治理对策。可以说,这类地质灾害不可怕(因可预防),但必须及早应对,做到防患于未然(否则,其灾难性后果与地震和火山喷发是等同的)。

## 5.3 关于长白山地区原发性火山灾害

本区原发火山灾害指再次火山喷发引发的一系列地质灾害。专家普遍认为,就目前的研究程度而言,还无法对再次喷发的基本情况进行有效预测<sup>①</sup>。本文仅从火山地层和火山架构的角度谈本区原发火山灾害的相关问题。长白山天池火山已经进入以酸性岩为主(或双峰式)的中心式火山喷发期。该类火山具有间歇期长、规模大、多呈强烈爆炸式的普林尼式或气水-岩浆喷发等基本特点,同时其火山喷口带大致呈环形,而且这个带可反映下伏岩浆囊的宽度<sup>[14,22]</sup>。从火山演化的旋回性看,该类火山作用的时限通常不少于相对应的基性火山活动时限。本区基性火山活动的持续时间通常认为已达千万年<sup>[25]</sup>。而本区酸性火山喷发旋回主要是更新世开始的,刚经历百万年时限,因此认为酸性喷发旋回应该尚未结束。但其趋势是在变弱还是在变强还有待进一步深入研究<sup>[35]</sup>。然而值得注意的是,目前天池破火山口与下伏岩浆囊的平面投影形态具一定对称性(均略呈南北向椭圆),但破火山口规模远小于岩浆囊<sup>[7,36]</sup>。由此看来破火山口进一步扩大(喷发趋势变强)的可能性是不能排除的。Rodolfo<sup>[37]</sup>在总结

<sup>①</sup> 何继善,刘嘉麒,彭苏萍,等.中国工程院“长白山火山”咨询会报告.北京:中国工程院学部工作局资料室,2011.

世界火山灾害时指出,某些最大规模的和最致命的火山泥石流灾害是由火山地区湖水的决口引发的。长白山天池地势高(湖面海拔 2 149 m)、蓄水量大(最深处 373 m、平均 204 m、总储水量为  $20 \times 10^8 \text{ m}^3$ )、略呈南北延伸的椭圆形(南北 4.85 km、东西 3.35 km、面积 9.82  $\text{km}^2$ )。这一巨量天池水,对于下一次火山喷发会有 2 种效应:一是这些水在火山断裂<sup>[38]</sup>作用下将会向下运移,大大增加岩浆与水在地下和近地表相互作用的机会,致使岩浆-气水喷发的可能性和强度显著增加;二是引发火山泥石流的可能性和强度都将大大增加,将对二道白河流域造成灾害<sup>[39]</sup>。至于下一次火山喷发是否恰好会改道、避开天池水的影响?这个问题目前还难以回答。然而,就长白山地区火山架构的特点来看,总体上属于多源火山,即表现为反复喷发的特点。通常这种多源火山具有充足而持续的岩浆供给速率,上升的岩浆熔体趋向于沿着先期岩浆开辟出的且仍旧热的通道向上运移(因该通道阻力最小)。长白山天池火山区岩浆系统深部结构探测结果显示<sup>[7]</sup>,在天池火山下部可能存在仍处于较高温度的先期岩浆输导通道<sup>[40]</sup>;因此,长白山天池火山下次喷发时,岩浆大体沿着原有路径向上运移的可能性预计会更大一些,即喷发中心仍在天池破火山口附近的可能性大于“改道”的可能性。考虑到天池火山千年大喷发的规模(喷出岩浆  $2.5 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ,约  $5 \times 10^{13} \text{ kg}$ ,烟云柱高超过 25 km)<sup>[24]</sup>,属很大型、突发性火山,爆炸性指数大于 5(表 2)。即便是再次喷发的规模与此相比减小 10 倍(喷出物  $5 \times 10^{12} \text{ kg}$ ),还属于大型、突发性火山,爆炸性指数大于 4(表 2),这大致相当于美国圣海伦火山 1980 年大爆发规模(喷出物  $1.3 \times 10^{12} \text{ kg}$ )<sup>[21]</sup>的 4 倍。近期研究成果显示,长白山天池碱流质火山岩浆建造速率快,从岩浆聚集到大规模喷发的时间短<sup>[41]</sup>,加之目前长白山还处于千年大喷发的节点<sup>①</sup>,因此其原发性地质灾害不应被低估,应该加强相关研究,因为这种原发性火山灾害通常是难以避免的。但若对于现今火山状态有较为充分的认知,对未来喷发状况能够进行一定程度的预测,则对于减灾防灾无疑是大有益处的。

#### 5.4 存在问题与今后研究方向

长白山火山的地质历史、现在基本状态和未来演化趋势,涉及到地质、地球物理和地球化学等相关领域,是需要长期探索的理论与实际课题。在此仅从火山地层和火山架构的角度,浅谈存在问题和今

后研究方向。总体来看,相关工作还处于起步阶段,火山地层的平面、剖面 and 三维大比例尺填图等基础性工作还尚未开展,致使对本区火山喷发期次,尤其是各期喷发物的特征和分布规律等基本地质事实还缺乏必要的量化认识。就长白山天池火山而言,主要地质景观,如火山湖(天池、小天池、王池、园池)、火山垣(围绕火山口的山链和山峰)、峡谷(锦江大峡谷、鸭绿江大峡谷、松花江大峡谷)、裂谷(梯子河)等,它们的火山地层序列及其在天池火山架构中的位置,每个地质单元的成因和各个单元之间的成因关系等,这些都是分解描述和整体认知长白山火山的基本研究内容。另外,还要开展岩浆喷发时的物理性状(温度、密度、黏度、流变性等)和挥发分及其就位后的变化规律等相关研究。火山地层学和火山架构研究必须用地震资料,需要借助地震火山地层学方法;因此,地面地质精细测量、钻孔地质及测井与地震相结合,是揭示长白山火山内部构成和建造过程的必由之路。最后,地面火山测量与地下岩浆囊探测相互佐证<sup>[13]</sup>、火山建造过程数值模拟及其喷发趋势预测也是需要高度重视的研究方向。同时还要对长白山火山各种类型喷出物与其产生的可能灾害(类型、特征、成因、结果)进行相关性研究和风险评估(表 5)。

## 6 结论

1)长白山火山喷出物可分为柱状节理熔岩、火山碎屑流和火山泥石流等 20 种基本类型,由这 20 种基本类型可构成洪泛玄武岩或大型黏滞流熔岩、柱状节理熔岩、枕状熔岩等 19 种火山地层单元。互相叠置的火山岩体可通过界面识别拆分成若干火山地层单元,从而进行火山岩体的分解描述,并可作为大比例尺火山地质填图的基本单元。

2)由 19 种火山地层单元可构成在长白山地区依次发育的单源火山田、洪泛玄武岩田、熔岩盾火山、中心式火山和层状复合火山等 5 种火山架构。通过火山地层学方法,研究火山架构的地上部分(包括火山地层单元、界面属性和叠置关系三要素),对厘清长白山火山喷发物的时空展布和演化规律具有重要意义。

<sup>①</sup> 何继善,刘嘉麒,彭苏萍,等.中国工程院“长白山火山”咨询会报告.北京:中国工程院学部工作局资料室,2011.

表 5 火山喷出物或火山作用产物与所导致的火山灾害之间的关系(据文献[42]整理)

Table 5 Volcanic hazard characteristics pertinent to risk(after references[42])

火山产物	特点及相关危害
熔岩流 (lava flow)	①温度高于许多物质的燃点;②流速从每小时几十米到 60 km/h;③埋藏或摧毁沿途物体;④充填地形洼地,可长达数千米;⑤持续喷发会引发有害阴霾
弹道状喷出物 (ballistic ejecta)	①火山喷口直径可超过 10 km,波及范围大;②落地具强撞击性;③密度大, $\leq 3 \text{ t/m}^3$ ;④温度高,新鲜火山弹温度高于许多物质的燃点
火山碎屑空落物 (tephra falls)	①顺风搬运速率从每小时 $<10 \text{ km}$ 到 $<100 \text{ km}$ ;②顺风向厚度呈指数降低;③沿风向延伸可超过 1 000 km;④灼热,粒径 $<64 \text{ mm}$ 物质处于热平衡状态;⑤可遮天蔽日,使白昼漆黑;⑥快速压实,几天之内厚度减半;⑦表层结壳,会使地面径流四溢;⑧磨蚀、传导和磁性,对相关设施的影响
火山碎屑流 (pyroclastic flows)	①浓密的气-固扩散;②流速可高达 160 m/s;③就位温度主要为 100~900 °C;④小型碎屑流向低洼处运行 5~10 km;⑤大型碎屑流迁移距离 50~100 km;⑥大型碎屑流可越过各种地形障碍物
火山碎屑涌浪 (pyroclastic surge)	①碎屑含量低,但高动能;②沉积半径 10~15 km;③能翻越各种地形障碍;④就位速率每秒 $>$ 几十米,冲击力巨大
火山泥石流 (lahars)	①可由 $<10 \text{ mm/h}$ 降雨引发;②流体的密度大, $2\sim 2.4 \text{ t/m}^3$ ,沉积物质量分数为 75%~90%;③峰值流量 $>10\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,通常的流速 $>10 \text{ m/s}$ ;④增加水体浑浊度和化学污染;⑤快速的加积、下切或侧向运移;⑥搬运距离可达几千米;⑦灾害持续时间长,可能延至喷发后数月或数年
火山冰水洪泛泥石流 (Jökullaups)	①突发性极强,事先几乎无任何预兆;②泄流量极大,可超过 $100\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ,即 1 s 内使 $10 \text{ hm}^2$ 面积达到水深 1 m
岩块/碎屑崩塌 (rock/debris avalanches)	①扇形崩塌,最小体积 $10\times 10^6 \text{ m}^3$ ;②运移距离可达 20~30 km;③覆盖范围可超过 $100 \text{ km}^2$ ;④就位速率极高,可达 100 m/s;⑤强烈改造地形,可形成池塘湖;⑥在海岸带能够引发海啸
地表变形 (ground deformation)	①危害波及半径通常在 15~20 km 范围内;②沉陷影响范围可达数百 $\text{km}^2$
空气冲击 (air shocks)	极强冲击波,可达 15 个 atm(使大气压 15 倍放大)
光电效应 (lightning)	①火山灰云引发的云-地光电效应;②大量火山碎屑引发的火花效应
火山喷气和气溶胶 (gases and aerosols)	①水气为主要成分;② $\text{SO}_2$ 居于第二位;③ $\text{SO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$ 、 $\text{HF}$ 、 $\text{HCl}$ 等火山喷气具强腐蚀性或反应性;④ $\text{CO}_2$ 在低地或水系不畅的地区聚集;⑤导致酸雨,雨水 pH 值可达 4.0~4.5

3)长白山火山灾害可分为原发和次生 2 种。其再次喷发不能排除属大型酸性岩浆爆炸式喷发的可能性,巨量的天池水沿断裂下渗可能会造成气-水喷发和爆炸性指数的增加,并且天池水下泄可引发火山泥石流,因此在灾害预防工作中应着重注意对火山碎屑流、火山碎屑涌浪和火山泥石流等灾害的研究;另外由不稳定的火山架构引发的山体滑坡和山崩等次生灾害也应引起注意。

#### 参考文献 (References):

[1] 刘若新,樊祺诚,郑祥身,等. 长白山天池火山的岩浆演化[J]. 中国科学:D 辑, 1998, 28(3):226-231.  
Liu Ruoxin, Fan Qicheng, Zheng Xiangshen, et al. Magma Evolution of Changbaishan Tianchi Volcano [J]. Science in China: Series D, 1998, 28(3):226-231.

[2] 汤吉,刘铁胜,江钊,等. 长白山天池火山区大地电磁测深初步观测[J]. 地震地质, 1997, 19(2):164-170.

Tang Ji, Liu Tiesheng, Jiang Zhao, et al. Preliminary Observations of the Tianchi Volcano Area in Changbaishan Mountain by MT Method [J]. Seismology and Geology, 1997, 19(2):164-170.

[3] 张先康,张成科,赵金仁,等. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究[J]. 地震学报, 2002, 24(2):135-143.

Zhang Xiankang, Zhang Chengke, Zhao Jinren, et al. Deep Seismic Sounding Investigation into the Deep Structure of the Magma System in Changbaishan Tianchi Volcanic Region [J]. Acta Seismologica Sinica, 2002, 24(2):135-143.

[4] 赵大鹏,雷建设,唐荣余. 中国东北长白山火山的起

- 源:地震层析成像证据[J]. 科学通报, 2004, 49(14): 1439-1446.
- Zhao Dapeng, Lei Jianshe, Tang Rongyu. The Origin of Changbai Mountain Volcano in Northeast of China: The Evidence of Seismic Tomography [J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(14):1439-1446.
- [5] 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[J]. 中国科学: D 辑, 1997, 27(5):437-441.
- Liu Ruoxin, Chou Shihua, Cai Lianzhen, et al. The Age of the Most Recent Eruption in Tianchi Volcano, Changbaishan and Its Implication [J]. Science in China: Series D, 1997, 27(5):437-441.
- [6] 解广轰, 王俊文, Basu A R, 等. 长白山地区新生代火山岩的岩石化学及 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学研究[J]. 岩石学报, 1988(4):1-13.
- Xie Guanghong, Wang Junwen, Basu A R, et al. Petrochemistry and Sr, Nd, Pb-Isotopic Geochemistry of Cenozoic Volcanic Rocks, Changbaishan Area, Northeast China [J]. Acta Petrologica Sinica, 1988 (4):1-13.
- [7] 魏海泉, 李春茂, 金伯禄, 等. 长白山天池火山造锥喷发岩浆演化系列与地层划分[J]. 吉林地质, 2005, 24(1):22-27.
- Wei Haiquan, Li Chunmao, Jin Bolu, et al. The Tianchi Forming Cone Eruptive Magmatic Evolutionary Series of the Changbaishan and Stratigraphic Division[J]. Jilin Geology, 2005, 24(1): 22-27.
- [8] Tilling R I, Heliker C, Swanson D A, et al. Eruptions of Hawaiian Volcanoes: Past, Present, and Future [M]. 2nd ed. Virginia: U S Geological Survey, 2010.
- [9] Jackson J A. Glossary of Geology [M]. 4th ed. Virginia: American Geological Institute, 1997.
- [10] 地球科学大辞典编委会. 地球科学大辞典: 基础科学卷[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
- Editorial Board of A Dictionary of Earth Geosciences. A Dictionary of Earth Geosciences: Foundation Course [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.
- [11] Doyle M G, McPhie J. Facies Architecture of a Silicic Intrusion-Dominated Volcanic Centre at Highway-Reward, Queensland, Australia [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, 99(1/2/3/4):79-96.
- [12] Waichel B L, Lima E F, Viana A R, et al. Stratigraphy and Volcanic Facies Architecture of the Torres Syncline, Southern Brazil, and Its Role in Understanding the Paraná-Etendeka Continental Flood Basalt Province [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2012, 215/216:74-82.
- [13] Naumann T, Geist D. Physical Volcanology and Structural Development of Cerro Azul Volcano, Isabela Island, Galapagos: Implications for the Development of Galapagos-Type Shield Volcanoes [J]. Bull Volcanol, 2000, 61(8):497-514.
- [14] Hurwitz D M, Long S M, Grosfils E B. The Characteristics of Magma Reservoir Failure Beneath a Volcanic Edifice [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2009, 188(4):379-394.
- [15] Burgisser A. Physical Volcanology of the 2 050 BP Caldera-Forming Eruption of Okmok Volcano, Alaska [J]. Bull Volcanol Bull Volcano, 2005, 67:497-525.
- [16] Carn S A. The Lamongan Volcanic Field, East Java, Indonesia: Physical Volcanology, Historic Activity and Hazards [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2000, 95(1/2/3/4):81-108.
- [17] Adams N K, Silva S L, Self S, et al. The Physical Volcanology of the 1600 Eruption of Huaynaputina, Southern Peru [J]. Bull Volcano, 2001, 62(8):493-518.
- [18] 刘若新, 魏海泉, 李继泰, 等. 长白山天池火山近代喷发[M]. 北京: 科学出版社, 1998:1-159.
- Liu Ruoxin, Wei Haiquan, Li Jitai, et al. The Modern Eruption of Changbaishan Tianchi Volcano [M]. Beijing: Science Press, 1998:1-159.
- [19] Sigurdsson H. The History of Volcanology [C]// Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanos. San Diego: Academic Press, 2000:15-37.
- [20] White J D L, Ross P S. Maar-Diatreme Volcanoes: A Review [J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2011, 201(1/2/3/4):1-29.
- [21] Pyle D M. Sizes of Volcanic Eruptions [C]// Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanos. San Diego: Academic Press, 2000:263-269.
- [22] Walker G P. Basaltic Volcanos and Volcanic Systems [C]// Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanos. San Diego: Academic Press, 2000:283-289.
- [23] Carey S, Bursic M. Volcanic Plumes [C]// Sigurdsson H. Encyclopedia of Volcanos. San Diego: Academic Press, 2000:527-544.
- [24] Horn S, Schmincke H. Volatile Emission During the Eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD [J]. Bulletin of Volcanology, 2000, 61

- (8):537-555.
- [25] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京:科学出版社, 1999:1-219.
- Liu Jiaqi. Chinese Volcanoes[M]. Beijing: Science Press, 1999:1-219.
- [26] Einsele G. Sedimentary Basins[M]. Berlin:Springer-Verlag, 2000:1-781.
- [27] White J D L, Houghton B F. Primary Volcaniclastic Rock[J]. *Geology*, 2006, 34(8):677-680.
- [28] LeMaitre R W, Streckeis A, Zanettin B, et al. Igneous Rocks: A Classification and Glossary of Terms [M]. London: Cambridge University Press, 1989:1-236.
- [29] 金伯禄, 张希友. 长白山火山地质研究[M]. 延吉: 东北朝鲜民族教育出版社, 1994:1-223.
- Jin Bolu, Zhang Xiyu. Researching Volcanic Geology in Mount Changbai[M]. Yanji: Northeast Korea Nationality Education Press, 1994:1-223.
- [30] 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, 1997:1-161.
- Liu Xiang, Xiang Tianyuan. Cenozoic Volcanoes and Pyroclastic Deposits in Northeast China: Resources and Hazards [M]. Changchun: Jilin University Press, 1997:1-161.
- [31] 王璞珺, 印长海, 朱如凯, 等. 中基性火山作用喷出物类型、特征与成因[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2010, 40(3):469-481.
- Wang Pujun, Yin Changhai, Zhu Rukai, et al. Classification, Description and Interpretation of the Volcanic Products: Ancient and Modern Examples from China[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(3):469-481.
- [32] Gehring I. The Use of Grain-Size Dependent Magnetic Susceptibility and Gamma-ray Measurements for the Detailed Reconstruction of Volcanostratigraphy: The Case of La Fossa di Vulcano, S. Italy[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2004, 138(1/2):163-183.
- [33] Xiao L, Wang C Z. Geologic Features of Wudalianchi Volcanic Field, Northeastern China: Implications for Martian Volcanology[J]. *Planetary and Space Science*, 2009, 57(5/6):685-698.
- [34] Wei H Q, Wang Y, Jin J Y, et al. Timescale and Evolution of the Intracontinental Tianchi Volcanic Shield and Ignimbrite-Forming Eruption, Changbaishan, Northeast China[J]. *Lithos*, 2007, 96(1/2):315-324.
- [35] Kuritani T, Kimura J, Miyamoto T, et al. Intraplate Magmatism Related to Deceleration of Upwelling Asthenospheric Mantle: Implications from the Changbaishan Shield Basalts, Northeast China[J]. *Lithos*, 2009, 112(3/4):247-258.
- [36] Song J L, Hetland E A, Wu F T, et al. P-Wave Velocity Structure Under the Changbaishan Volcanic Region, NE China, from Wide-Angle Reflection and Refraction Data[J]. *Tectonophysics*, 2007, 433(1/2/3/4):127-139.
- [37] Rodolfo K S. The Hazard from Lahars and Jökulhlaups[C]//Sigurdsson H. *Encyclopedia of Volcanos*. San Diego: Academic Press, 2000:973-995.
- [38] 吴建平, 明跃红, 刘一鸣, 等. 2002年8月20日长白山天池火山小震震群研究[J]. 地震地磁观测与研究, 2003, 24(4):1-8.
- Wu Jianping, Ming Yuehong, Liu Yiming, et al. A Study on the Micro-Earthquake Swarm Occurred on Aug 20, 2002 in Changbaishan Tianchi Volcano[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 2003, 24(4):1-8.
- [39] 杨清福, 薄景山. 长白山天池火山的研究现状与展望[J]. 自然灾害学报, 2007, 16(6):133-139.
- Yang Qingfu, Bo Jingshan. Statusquo and Prospects for Research on Tainchi Volcano in Changbai Mountain[J]. *Journal of Nature Disasters*, 2007:16(6):133-139.
- [40] Hetland E A, Wu F T, Song J L. Crustal Structure in the Changbaishan Volcanic Area, China, Determined by Modeling Receiver Functions[J]. *Tectonophysics*, 2004, 386(3/4):157-175.
- [41] Zou H B, Fan Q C, Zhang H F. Rapid Development of the Great Millennium Eruption of Changbaishan (Tianchi) Volcano, China/North Korea: Evidence from U-Th Zircon Dating[J]. *Lithos*, 2010, 119(3/4):289-296.
- [42] Blong R. Volcanic Hazards and Risk Management [C]//Sigurdsson H. *Encyclopedia of Volcanos*. San Diego: Academic Press, 2000:1215-1227.

## 图版说明

A. 火山泥石流(Q), 厚层状, 粗粒为主, 粒序性不明显, 剖面位置: 长白山东麓考察点4, 距喷发口18 km, 经纬度: N42°3'37.85", E128°15'37.26"; B. 火山泥石流(Q), 粒度细、层薄、成层性好, 向上变细变薄, 剖面位置: 考察点9, 距喷发口24 km, 经纬度: N42°5'32.38", E127°47'30.29"; C. 涌浪沉

积和岩块滑塌-崩落堆积(Q),剖面位置:长白山南坡天池火山口处,经纬度:  $N42^{\circ}58'40''$ ,  $E128^{\circ}2'20''$ ; D. 岩块滑塌-崩落堆积(Q),剖面位置:长白山西坡天池火山口处(考察点 5),经纬度:  $N41^{\circ}59'50.13''$ ,  $E128^{\circ}1'40.14''$ ; E. 火山碎屑流堆积和原地炭化木(Q),剖面位置:长白山南坡; F. 火山碎屑流沉积(Q),见大型喷气管构造,剖面位置:考察点 7,长白山西坡锦江大峡谷,经纬度:  $N41^{\circ}53'56.85''$ ,  $E127^{\circ}54'40.98''$ ; G. 柱状节理玄武岩( $N_1$ )中内部生长构造,为新生岩浆溢流口,剖面位置:考察点 12,十五道沟望天鹅景点,经纬度:  $N41^{\circ}34'16.37''$ ,  $E127^{\circ}56'35.65''$ ; H. 柱状节理玄武岩( $N_1$ )中新生岩浆溢流口,环状节理发育,最后一期岩浆几乎填满整个通道,剖面位置:十五道沟望天鹅景点(考察点 12),经纬度:  $N41^{\circ}33'54.09''$ ,  $E127^{\circ}56'40.1''$ ; I. 柱状节理玄武岩( $N_2$ )中新生岩浆溢流口(军舰山第⑨层底部),外部为环状节理和环状排列气孔,内部为火山角砾和熔岩流充填。剖面位置:考察点 2,和龙市崇善镇军舰山,经纬度:  $N42^{\circ}5'54.36''$ ,  $E128^{\circ}59'56.94''$ ; J. 马鞍山组玄武岩( $E_3 - N_1$ )与奥陶系(O)灰岩角度不整合接触界面,剖面位置:考察点 13,长白县八道沟镇北,

经纬度:  $N41^{\circ}32'36.73''$ ,  $E127^{\circ}18'14.07''$ ; K. 柱状节理玄武岩( $N_1$ )和火山角砾熔岩( $J_2$ )角度不整合界面,剖面位置:考察点 12,长白县十五道沟望天鹅风景区,经纬度:  $N41^{\circ}34'8.22''$ ,  $E127^{\circ}56'41.5''$ ; L. 柱状节理玄武岩( $N_2$ )与下伏海西期花岗岩( $\gamma_3^1$ )不整合界面,二者之间发育 2~7 m 厚的复成分砂砾质松散沉积物,剖面位置:考察点 1,经纬度:  $N42^{\circ}5'32.88''$ ,  $E128^{\circ}59'15.54''$ ; M. 马鞍山组( $E_3 - N_1$ )上部玄武岩与硅藻土间角度不整合界面,硅藻土厚约 20 m,为两期玄武岩间夹层,剖面位置:考察点 13,长白县八道沟镇北,经纬度:  $N41^{\circ}33'12.91''$ ,  $E127^{\circ}18'42.28''$ ; N. 柱状节理玄武岩( $N_2$ )序列中从柱体的规则(柱廊 a)和不规则(柱眉 b 和柱顶 c)再到规则构成的不同喷发单元和喷发单元间冷凝界面,剖面位置:考察点 3,经纬度:  $N41^{\circ}59'58.34''$ ,  $E128^{\circ}33'39.89''$ ; O. 柱状节理玄武岩( $N_2$ )中的冷凝面和松散层(军舰山第⑧、⑨层间界面),见牛粪状火山蛋,剖面位置:考察点 2,和龙市崇善镇军舰山,坐标:  $N42^{\circ}5'54.3''$ ,  $E128^{\circ}59'58.14''$ 。

图版

