

# 中基性火山作用喷出物类型、特征与成因

王璞珺<sup>1</sup>, 印长海<sup>2</sup>, 朱如凯<sup>3</sup>, 闫林<sup>3</sup>, 边伟华<sup>1</sup>, 黄玉龙<sup>1</sup>, 吴颜雄<sup>1</sup>

1. 吉林大学 地球科学学院, 长春 130061

2. 大庆油田有限责任公司 勘探开发研究院, 黑龙江 大庆 163712

3. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

**摘要:** 基于松辽盆地中生代和准噶尔盆地古生代火山岩研究资料与长白山、五大连池等现代火山考察, 结合国外典型实例, 将火山作用喷出物分为熔岩、碎屑熔岩、火山碎屑岩和沉火山碎屑岩 4 类; 前两类岩石冷凝固结, 后两类压实固结。按成分-组构-岩相分类方案划分出 34 种岩相。详细论述了各岩相的成岩方式、成分、组构、成因和产状, 并给出各岩相类型的实例和典型照片。建造-改造和继承-变异分析对比显示, 现代火山与古火山都常见的岩相包括厚层熔岩、熔结结构碎屑熔岩、柱状节理熔岩、枕状熔岩和玻璃质熔岩。现代火山常见而古火山少见或未见的有浮岩、渣状熔岩、绳状和块状熔岩。火山穹窿垮塌是常见的同生改造作用。裂隙式与中心式喷发往往相伴而生, 常表现为沿着深大断裂的一系列中心式喷发。

**关键词:** 松辽盆地; 准噶尔盆地; 白垩系营城组; 石炭系巴塔玛依内山组; 中基性火山岩相; 火山岩储层; 火山岩

中图分类号: P618.13; P588.14

文献标识码: A

文章编号: 1671-5888(2010)03-0469-13

## Classification, Description and Interpretation of the Volcanic Products: Ancient and Modern Examples from China

WANG Pu-jun<sup>1</sup>, YIN Chang-hai<sup>2</sup>, ZHU Ru-kai<sup>3</sup>,  
YAN Lin<sup>3</sup>, BIAN Wei-hua<sup>1</sup>, HUANG Yu-long<sup>1</sup>, WU Yan-xiong<sup>1</sup>

1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

2. Exploration & Development Institute, Daqing Oilfield Company Ltd., Daqing, Heilongjiang 163712, China

3. Petroleum Exploration and Development Institute of PetroChina, Beijing 100083, China

**Abstract:** The volcanic products in China were classified into 4 groups including lava, pyroclast-bearing lava, tephra and tuffites, according to the research on the ancient volcanic rocks of the Songliao basin in Cretaceous and the Junggar basin in Carboniferous and also on the Quaternary volcanoes like Changbai and Wudalianchi. The former two groups are consolidated by cooling/crystallization and the latter two by compaction. Thirty four essential lithofacies/intrafacies were further subdivided and described in detail concerning their structure/texture, composition/component, distribution and origin. Typical examples ancient and modern are presented in photographs related to each intrafacies. There are both sameness and difference between modern and ancient volcanic products. Diversity of lavas such as coherent massive, columnar joint, welded, pillow and breccia can survive in the long geological history, becoming relatively more abundant in the ancient volcanoes. On the other hand, pumice, aa and block lavas become less and less with time owing to their poor preservation because they are generally on top or edge of a volcanic succession and/or with features of being easily eroded and transported. For most

收稿日期: 2009-10-09

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2007CB209507, 2009CB219303)

作者简介: 王璞珺(1959—), 男, 黑龙江绥滨人, 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, Tel: 0431-88502620, E-mail: wangpj@jlu.edu.cn.

ancient volcanoes like those in the Mesozoic Songliao basin, it is very common that eruptions are mixed pattern between the fissure and the central, i.e. most single central vents are associated with or ranged along some major faults.

**Key words:** Songliao basin; Junggar basin; Cretaceous Yingcheng Formation; Carboniferous Batamayineishan Formation; mafic and intermediate volcanic facies architecture; volcanic reservoir; volcanic rocks

## 0 引言

认识火山物质是人们长期探求的目标<sup>[1]</sup>。现代地质科学意义上的火山作用喷出物分类和描述可追溯到 19 世纪中叶<sup>[2]</sup>。到目前为止,火山作用喷出物的分类和描述主要是针对现代火山,通常是以夏威夷这样典型的火山持续而系统的研究为基础的。具体火山实例的研究中,多按岩性和结构构造将火山物划分成各种岩相类型<sup>[3-5]</sup>。Fisher and Schmincke<sup>[2]</sup>依据搬运方式将火山碎屑物分为降落、碎屑流和火山泥石流。Cas and Wright<sup>[6]</sup>依据搬运和成

岩方式将火山物分为熔岩流、碎屑流、空落沉积和熔结凝灰岩类。Schmincke<sup>[7]</sup>基于火山作用与板块构造的关系,详细论述了洋中脊、板内和板缘火山产物的类型和特征。Nault<sup>[8]</sup>将喷发方式(爆发与溢流)、岩浆粘度(受控于成分、温度和挥发分含量)和喷发类型(多以典型地区命名,如夏威夷式等)等反映火山活动特征的三要素结合起来,提出较为系统的火山作用喷出物分类与描述方案。笔者认为,该划分方案对理解火山作用产物之间的关联性很有帮助,故整理并列于表 1,作为本文的工作基础。

表 1 基于岩浆流变性(粘度)和喷发类型的火山喷出物分类(据文献[8]整理)

Table 1 Classification of volcanic products based on rheology and eruption style (based on reference[8])

|                               | 强流动性<br>(夏威夷式)  | 中等流动性<br>(斯通博利式)  | 中等粘性<br>(武尔卡诺式)   | 粘性到高粘性<br>(普林尼/培雷式)   | 火山蒸汽喷发<br>(苏特式/武尔卡诺式)   |
|-------------------------------|---|---|---|---|---|
| 爆发式喷发<br>(explosive eruption) | 熔岩滴锥 (spatter cone):热熔滴回落,并围绕火山口堆砌成锥形;被抛出碎屑物形状源于其低粘度。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,它们凝固固结形成称之为火山丝和火山泪的线状火山玻璃 | 火山渣锥(cinder cone): 又称斯通博利锥,由熔岩块、火山渣、火山弹和火山砾围绕塌陷火山口堆积而成,是最常见的陆上火山构造;常有寄生火山锥与之共生。喷出物有时迅速旋转,外形呈特征的纺锤状“旋转火山弹” | 爆炸火山口凹陷(explosion crater):岩浆的粘性加上水的存在导致较强烈爆发,形成高宽/深比的杯状破火山口。典型喷出物为玻壳火山弹,内部泡沫状。火山弹落地后内部泡沫气体膨胀,内压力使外壳破裂,形如硬壳面包,称为“裂巴状火山弹” | 复合火山(composite stratovolcano):由高粘度岩浆的长期火山建造作用形成。喷发形成大型普林尼式烟云柱,其锥形降落物覆盖面积巨大,也有浮岩块产生。在塌陷火山口被火山穹隆阻塞之处,会出现单向喷发,此时只影响火山的某一区域 | 气水岩浆相互作用喷发(phreatomagmatic eruption):岩浆与水遭遇产生强烈爆炸。若二者于深处相遇,便形成典型的火山景观——玛尔湖,即,顶宽下窄、很深的圆形火山管道。若潜水面接近地表且爆炸发生在较浅的水下,便形成玻屑或水成碎屑凝灰岩。无论哪种情况,与水接触的浆屑都会被水浸透并呈特征的瘤状(菜花状火山弹) |
| 式喷发<br>(effusive eruption)    | 绳状熔岩流(pahoehoe flows):具极光滑表面的、像焦糖一样连贯的熔岩流。流体表面会固结,并起皱纹形成绳状熔岩;也可以发芽或分叉的方式前行。每一流动方式都产生自身特色的形态,故称之为“布丁熔岩”  | 渣状熔岩流(aa flows):表面粗糙的熔岩流,含有直径从几厘米到数米的火山渣集块。其流动方式如同履带车轨迹,且常与绳状熔岩共生;其实某熔岩流在一次喷发过程中会从二者中的一种变为另一种             | 块状熔岩流(lava-block flows):类似于渣状熔岩,区别在于其熔岩不是熔渣状而是锯齿状的玻璃质岩块。黑耀岩特别易于形成这种熔岩流  | 熔岩穹和熔岩塔(domes and spines):属于侵出相,形成于缓慢流动的岩浆。按自由流动能力可分为 3 种类型侵出体:流动熔岩穹隆形如扁平蛋糕;培雷式熔岩穹隆的熔岩较为粘稠,因此摊开的面积较小;第三种最具特征,为熔岩塔       | 枕状熔岩(pillow lava):属于形态命名,形成于浸入深水下的熔岩流,是由其特定的运动方式所致。即,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转移  |
|                               | 岩浆粘性由小 变大   |   |   |   |   |

### 1 火山作用喷出物分类及其特征和成因

现代火山研究结果无疑对古火山研究具有无以伦比的指导和借鉴作用。然而,现代(或第四系)火山是近 2.59 Ma 以来的火山活动记录;而古火山,如松辽盆地白垩系营城组和准噶尔盆地石炭系巴塔玛依内山组,通常都经历了几到十几百万年的喷发时限,就其喷发类型、规模和产物特点等方面,现代火山与古火山显然存在差异。另一方面,古火山经历了更长时间的改造,尤其是埋藏于千米之下的盆地火山岩,它们普遍经历了出露剥蚀、差异块断和埋藏改造等过程,其火山物质的保存状况必然会与现代火山出现明显差别。

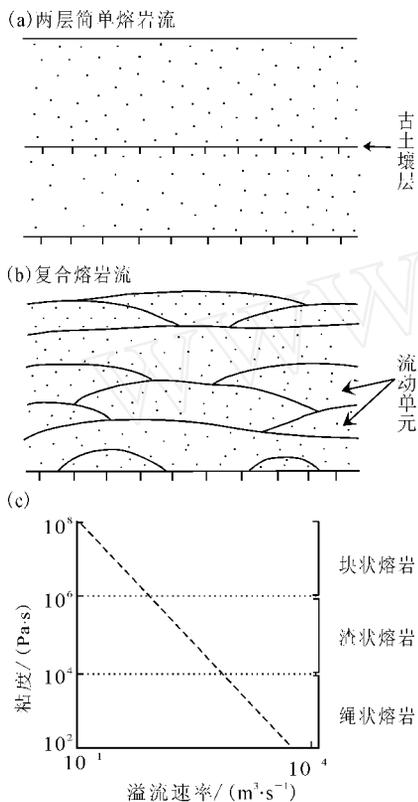


图 1 岩相类型(如绳状、渣状和块状)及流动状态(简单流与复合流)与岩浆流速和粘度的关系<sup>[7]</sup>

Fig. 1 Simple and compound lava flow<sup>[7]</sup>

作为西方现行分类的代表,表 1(可称为组分-成因分类)确实具有系统性强和易于理解与掌握等优点,但它仅涉及现代火山,且类型不够全面,即,大量的其它火山作用产物在该表中没有位置。另外,火山作用产物类型和特征除受喷发类型和岩浆粘度影响外,还与成分、流速和流动状态等多种因素有关

(图 1 和图 2)。因此,单因素分类方案难以包罗如此复杂的火山产物体系。同时,笔者在盆地火山岩的研究实践中感受到,现代火山喷出物与前新生代古火山保存物之间存在显著性差别,完全套用现代火山产物的分类方案在古火山研究中往往会遇到困难。本文主要针对盆地火山岩,尤其是中基性火山岩,进行火山喷出物的分类与刻画研究。笔者依据松辽盆地和准噶尔盆地火山岩研究资料和对我国典型第四系火山的实地考察,结合国外实例,提出火山作用喷出物的成分-结构-岩相划分方案(表 2),各种火山喷出物典型岩相特征见图版。

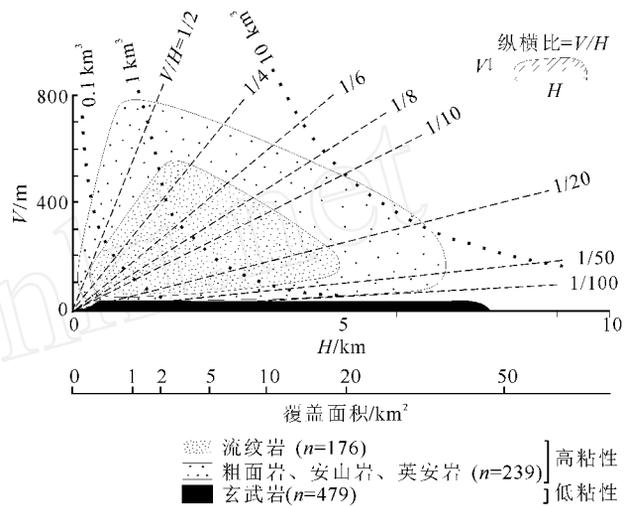


图 2 岩浆成分(基性、中性、酸性)与熔岩厚度 V、覆盖面积、等效直径 H(等面积圆的直径)、岩浆体积(点线)和纵横比 V/H(虚线)的关系<sup>[7]</sup>

Fig. 2 Dimensions of lavas of different compositions<sup>[7]</sup>  
横轴用岩浆覆盖面积和等效直径共同表示

### 2 问题讨论

古火山物质对其相应原始喷发物的继承性,是应用将今论古方法研究古火山机构和火山岩的基础。笔者对松辽盆地东南隆起区火山岩分布区的岩性、岩相、火山机构及其与盆内火山岩的对比研究揭示,盆缘与盆内火山岩虽经历了不同的改造历程,但二者在火山机构物理模式、岩性岩相组合及其叠置关系等诸多方面的确存在很多可比性,盆内和盆缘都可保存完整的火山机构<sup>[22-23]</sup>。另一方面,现代火山岩分布区常见的多孔火山集块(浮岩等)在松辽盆地从未见到,在准噶尔盆地也很少见。由此说明,在火山物质喷出地表后的形成演化过程中,既有继承

表 2 中性火山作用喷出物类型、特征与成因

Table 2 Classification, description and interpretation of the volcanic products in the sequence of diagenesis, intrafacies, composition, texture and origin

| 成岩方式                                       | 岩相类型  | 成分及其特征  | 组构及其特征   | 成因和产状  |
|--|---|---|--|--|
| 火山熔岩 (熔岩基质中分布的火山碎屑体积分 < 10% , 冷凝固结) (图版 A) | (1) 洪泛玄武岩或大型粘滞流熔岩 (flood basalt or coherent massive lava/flow) (图版 A) | 从基性到酸性的厚层状熔岩, 斑状结构, 斑晶和基质成分与结构取决于岩性; 常见气孔杏仁体、流动构造和垂向分带性; 喷发速率高, 是构成大型火山岩台地的主体 | 厚层状 (单层几米到上百米)、分布面积广; 气孔杏仁呈拉长定向, 常于岩层的上下多、中间少或无; 陆上和水下均可形成。岩层越厚, 流动和固结所需时间越长; 气体向上运移越充分, 气孔往往越少。据气孔杏仁和流动构造发育程度可将岩层垂向划带   | 低纵横比 的非渠道型被状熔岩流, 常见于喷发中初期, 与枕状熔岩相比其岩浆流速和温度较高。气孔是岩浆流动冷凝过程中圈闭的气泡, 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。洪泛玄武岩被认为是板内岩浆作用的代表 |
|  | (2) 柱状节理熔岩 (columnar joint) (图版 C)                                    | 玄武岩常见, 亦见中性岩。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        | 单个柱体呈多边形 (四到六边形为主), 规则或不规则, 近直立、弯曲至平卧; 横向上岩体直径几十米到上千米; 厚十几米到上百米, 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); 一般底部无根, 常直接坐落在较松散的火山碎屑岩与玻璃熔岩混积体之上  | 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。以侵入相为主亦可有近地表的次火山岩   |
|  | (3) 枕状熔岩 (pillow lava) (图版 D)   | 玄武岩及安山岩常见, 亦有流纹岩。呈岩球和岩枕堆积状的熔岩; 可见淬火边、气孔、热收缩缝和舌状体, 角砾岩化普遍                      | 二维露头剖面上多呈孤立的肾状椭球体、大头指向流动方向, 直径十几厘米到大于 1 m; 球体间可见深水或生物沉积; 可见舌状体 — 孤立或紧密堆积的岩枕 — 枕状角砾岩侧向过渡; 常构成深海蛇绿岩套组合的上部  | 为中低喷发速率的管状水下熔岩流交织叠置而成, 单个熔岩管可达 10 m 宽、2 ~ 4 m 高, 自下而上熔岩管道规模逐渐变小, 岩枕彼此接触; 新生熔岩流挤出的凹角指向流向                                      |
|  | (4) 块状熔岩 (block lava) (图版 E)  | 中性、酸性和碱性岩均有。直径十几厘米到米的大型熔岩集块堆积体, 成分单一, 无细粒基质充填; 多见于中小规模现代火山喷发旋回的顶部和边部          | 3 种成因类型: (a) 岩浆沿陡坡流动时前缘冷却呈凝块状似球体, 顺坡而下构成后续熔岩流的底层集块熔岩。(b) 当高粘度 (中酸性及碱性) 岩浆高度聚合时, 熔浆的固相线与液相线之间的温差很小, 表层迅速固化成火山玻璃, 同时内部热熔体冲破壳形成含气更少的浮岩化黑耀岩; 当这类岩浆形成高耸侵出体并剥落时岩块会发生位移。(c) 较低粘度 (较高温度且富含挥发分的基性岩浆) 中小型熔岩流, 流动过程中, 就位后其顶部快速冷却收缩, 在裂缝切割、塌陷和下部熔岩流上拱等单独或共同作用下形成集块堆积体; 多与不规则柱状节理和绳状玄武岩共生; 可呈熔岩管塌陷、长形压拱和坟状火山包 |  |
|  | (5) 绳状熔岩 (pahoehoe) (图版 F)  | 见于玄武岩。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); 常见天然堤  | 极低粘度岩浆流动形成, 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 (但未见相反情况)   |
|  | (6) 涌浪或涌浪状熔岩 (billowy flow) (图版 G)                                    | 见于玄武岩, 为波长和波高几十厘米到 2 m 以上的波状起伏形玄武熔岩-碎屑岩组合体; 与绳状及渣状和块状熔岩共生                     | 自外向内可见 4 层结构: (a) 外壳 10 cm 左右, 含拉长状大气孔的黑色玻璃质熔岩, (b) 内壳 20 cm 左右, 含拉长及不规则状气孔的深褐色隐晶熔岩, (c) 外核 50 cm 左右, 含火山渣的紫红色层状气孔熔岩, (d) 内核 > 50 cm, 暗褐色渣状熔岩  | 为低粘度岩浆汹涌澎湃式地快速流动, 同时履带式裹裹表层火山渣而成。其表面常见大型多方向冷却收缩裂缝, 将熔岩切成大块 (块状熔岩)  |
|  | (7) 脉岩  | 成分从酸性到基性都有, 以中性居多; 除产状外, 岩脉与火山岩有时很难从岩性上区分。如松辽盆地营城组火山岩中的基性岩脉既有粗玄武岩又有辉绿玢岩       | 火山口和近火山口地区脉岩通常都很发育; 厚几十厘米到 10 m 以上, 形状规则、锯齿状, 常沿追踪张性节理发育, 产状陡 (近直立); 从岩脉与围岩的接触边界到中心具分带性, 自外向内结晶程度变好, 边缘可见流动构造  | 深源 (多为幔源) 岩浆沿超壳断裂运移至近地表; 断裂性质以高角度张剪性为主, 岩脉走向与区域节理关系有两种: 平行某一组节理或沿两组共轭节理对角线方向; 岩脉多成群产出, 且与区域断裂于火山口附近相交                        |

表 2(续)

| 成岩方式  | 岩相类型   | 成分及其特征   | 结构及其特征  | 成因和产状  |
|---|--|--|---|--|
|   | 玻璃质 (8) 黑耀岩<br>熔岩 (obsidian)<br>(图版 H)           | 含水 < 1% 黑色或褐色火山玻璃  | 有明显的玻璃光泽, 贝壳状断口   | 酸性为主(成分同流纹岩), 也见中性和基性者, 可含斑晶(微晶)/ 雏晶和流动构造或呈带状, 中酸性者中可见斜长石、黑云母、角闪石乃至单斜辉石斑晶, 酸性-基性双峰式岩浆混合区的酸性火山玻璃中常见基性包裹体; 为岩浆快速冷凝产物, 多见于水下喷发或水中冷凝; 常形成于熔岩流的顶、底和前线, 单层可厚达几十米; 常呈凸起的岩穹和岩塔 |
|   | (9) 珍珠岩<br>(perlite)                             | 含水 3% ~ 5% 浅灰、绿灰、淡绿或浅褐色火山玻璃, 粉末白或灰白  | 珍珠或油脂似光泽, 珍珠结构(圆弧状的冷凝收缩裂纹); 多为黑耀岩水合作用产物   |  |
|   | (10) 松脂岩<br>(pitchstone)                         | 含水 4% ~ 10% 火山玻璃, 各种颜色, 以黄绿色居多   | 松脂光泽和贝壳状断口, 状如松香块, 多为珍珠岩蚀变产物  |  |
| 火山碎屑熔岩 (熔岩基中分布的火山碎屑体积分数 > 10%, 冷凝固结) pyroclast-bearing lava | (11) 渣状(集块)熔岩<br>(aa flows), 集合体                 | 炉渣状的熔岩集块集合体, 产于粘度介于绳状与块状熔岩流之间的玄武岩浆中  | 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)和天然堤; 与绳状、块状熔岩共生   | 比绳状熔岩厚, 单层 2 ~ 3 m, 最大可达 20 m 以上, 流动慢; 熔岩流前缘为锯齿状, 通过前缘变陡-碎裂的方式履带式蠕动前进  |
|   | (12) 堆砌角砾岩<br>(pile-up breccia) (图版 I), 集合体      | 一种以同生火山碎屑为主的角砾岩和集块岩; 堆砌结构(貌似混凝土)是其标志性特征  | 砾石以同源火山碎屑为主, 外碎屑体积分数通常小于 5%, 棱角状、无分选, 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                                     | 见于火山口内侧(火山颈), 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/ 压实胶结成岩而成; 角砾包括同期浆屑、岩屑和先期岩屑及非火山围岩碎屑  |
|   | (13) 熔结结构角砾/ 集块熔岩 (ignimbrite/ agglutinate), 集合体 | 中酸性和碱性岩常见; 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)或浅色边(热基质使冷碎屑边缘重结晶)等环带结构; 塑性及刚性碎屑定向及拉长, 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粘度(成分和温度)、岩层静压力(厚度)及碎屑和挥发分含量, 高温和低粘度岩浆利于形成强熔结结构; 焊接起始温度 600 ~ 750                                    |
|   | (14) 隐爆角砾岩 (图版 J) cryptoexplosive breccia, 集合体   | 常见于以熔岩为主的火山机构中心部位  | 岩石由宿主岩原地角砾和岩汁(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后期高压流体(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半胶结  |
|   | (15) 构造角砾岩<br>(tectonic breccia) (图版 O), 集合体     | 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; 侧向延伸常几十米到数千米   | 为构造作用将岩石张、剪、压碎成原地角砾, 其中较细碎及少量流体析出物将角砾胶结/ 部分胶结而成; 常成组出现   |
|   | (16) 火山弹 (bomb)<br>(图版 M), 单体                    | 从火山喷口抛到空中的、粒径 > 64 mm 塑性、新生火山碎屑物, 于空中或落地不久冷凝固型                                     | 可见刚性岩屑等作为核心; 按形态分为丝带、纺锤、牛粪和似球状; 外壳为淬火玻璃, 由于外硬内软、内部气体膨胀会导致外壳破裂   | 中酸性岩火山弹表面裂隙比基性岩更发育; 菜花状火山弹(图版 N) (内部有或无气孔)是岩浆与水作用的结果; “披甲火山弹”是在富蒸汽喷发条件下刚性碎屑被火山灰包裹  |
| (17) 火山渣 (scoria/ cinder) (图版 M), 单体                        | 炉渣状多孔的暗色玄武岩和玄武安山岩集块, 较大者表面可为绳状或纤维状               | 密度 > 1 g/cm <sup>3</sup> 沉于水, 结晶比浮岩稍好, 多孔且气孔径最小不低于 5 μm; 是构成火山渣锥的主体; 多与中小型基性火山喷发有关 | 均为爆发形成的多孔火山玻璃, 有的曾被抛到空中属火山弹类, 有的为熔岩流前缘折断或重力分异出的熔渣; 气泡形成于挥发分扩散和岩浆释压; 若外壳已固结内部气体仍在膨胀, 则中心的较大压力会导致气孔径内外大小的环带状分带性   |  |
| (18) 浮岩块 (pumice)<br>(图版 M), 单体                             | 多为浅色粘度较高的中酸性和碱性岩, 可含斑晶                           | 密度 1 g/cm <sup>3</sup> 浮于水, 等轴或长形或扁平, 棱角或圆状, 气孔排列可呈层状、环带状或不规则状                     |   |  |
| (19) 熔岩滴 (spatter)<br>(图版 M), 单体                            | 属完全熔融态的玄武质火山岩, 为熔岩滴落地就焊接到一起而成(与彼此不粘着的火山渣不同)      | 熔岩滴锥主要由熔结集块岩火山弹构成。熔岩滴丘是无根、几米高的小型锥体, 为围闭的地下水引发的局部爆发形成                               | 玄武岩喷泉溅落或火山口直接溅出的熔岩滴, 围绕火山口堆砌而成, 是构成低粘度玄武岩浆喷发火山垣的重要组成部分  |  |

表 2(续)

| 成岩方式   | 岩相类型   | 成分及其特征  | 结构及其特征  | 成因和产状   |
|--|--|---|---|---|
| 火山碎屑岩<br>(火山碎屑体<br>积分数 ><br>90%, 压实固<br>结) pyroclastic | 火山碎屑空落沉积<br>(pyroclastic fall de-<br>posits) (图版 L)  | (20) 空落火山灰 (ash-<br>fall): 包括粒径 2 ~ 1/16<br>mm 火山灰和 < 1/16 mm<br>火山尘; 见于基性到酸性<br>的所有岩性<br>(21) 空落浮岩 (pumice-<br>fall): 见于安山、流纹及碱<br>性岩; 多孔降落碎屑<br>(22) 空落火山渣 (scoria-<br>fall): 玄武-玄武安山岩<br>质; 渣状多孔降落碎屑                               | 空落火山渣和浮岩远离火山口常过渡为火<br>山灰沉积。可见于所有岩性和喷发类型,<br>尤其是强爆炸的武尔卡诺式喷发; 岩浆蒸<br>汽喷发产生的火山灰最多, 且含增生火山<br>砾<br>常见于亚普林尼、普林尼到超普林尼式等<br>中等到强爆炸式喷发产物; 分布广、层薄<br>(很少 > 10m)  | 被抛到空中碎屑物的自由落体式沉降物或<br>弹道式飞行降落物; 弹道状坠石 (大头朝<br>下、近 60° 入射角) 是标志性特征。细粒者<br>顺风而下, 呈沿风向的单向分布。形成低<br>处和高处近等厚的披盖式沉积; 近火山口<br>粒径多大于 64mm, 富含弹道状岩屑集块<br>和火山弹; 远离火山口粒度和厚度变小; 多<br>为厚层状、板状, 粒序层理或块状, 分选中<br>等到好。火山灰虽可远距离 (上千千米) 搬<br>运, 但火山口附近最厚。湖相空落沉积可<br>形成保存完好的纹层状韵律层理, 其间可<br>见粒序层理和坠石 |
|  | 火山碎屑流沉积<br>(pyroclastic flow de-<br>posits) (图版 K)   | (23) 火山渣流 (scoria-<br>flow): 玄武-玄武安山质<br>多孔火山砾和表面绳状的<br>火山渣<br>(24) 浮岩流 (pumice-<br>flow): 厚层状的火山灰、<br>圆状浮岩砾和集块 (直径<br>偶达 1 m)<br>(25) 集块-灰流 (block and<br>ash flow): 主要为无气孔<br>的同源岩块 (直径可达 5<br>m) 和作为基质的火山灰                         | 通常无分选, 有时大颗粒逆粒序, 于流动<br>单元底部可见细粒底积层; 有时可含无气<br>孔同生岩块 (直径可达 1 m)<br>分选差, 浮岩逆粒序, 岩块正粒序, 但多不<br>显粒序; 于流动单元底部可见细粒底积层;<br>可与熔结凝灰岩互层<br>无分选, 碎屑成分单一; 岩块可见放射状冷<br>凝节理; 单个流动单元为逆粒序  | 含大量碎屑的高密度气-固热重力流, 沿底<br>部流动; 为层流或活塞流 (状如消防龙头<br>的射流), 就位温度 > 300, 搬运速率高达<br>100 m · s <sup>-1</sup> ; 搬运能量源于喷发柱雪崩式<br>垮塌及其高喷发速率; 地形控制的填凹补<br>齐式充填沉积; 可见流动单元叠置层理、层<br>内剪切扩散层理、喷气管和炭化木。与常<br>温下形成的碎屑流沉积的标志性区别是其<br>强定向的高热刺磁。与涌浪相比, 其分选<br>差, 块状, 常显难辨的粒序性、线理或定向<br>颗粒的叠瓦构造          |
|  | 火山碎屑涌浪沉积<br>(pyroclastic surge<br>deposits) (图版 L)   | (26) 灰云浪 (ash-cloud<br>surge): 碎屑流顶部沿坡<br>而下的热灰云涡流沉积<br>(27) 基浪 (base surge): 基<br>性、中酸性及碱性均有; 为<br>各种粒度的浆屑 (因强爆<br>炸常小于 10 cm)、玻屑、<br>岩屑、晶屑和火山灰, 可含<br>大量增生火山砾<br>(28) 底浪 (ground surge):<br>沉积物为以不同比例混合<br>的火山灰、新生浆屑、多孔<br>碎屑、晶屑和岩屑 | 单层小于 1 m, 见于火山碎屑流之上或呈<br>侧向相变; 单向底形, 膨胀构造, 小型喷气<br>管; 以火山灰和晶屑为主<br>常见上攀砂丘、低角度削截、U 形侵蚀渠,<br>弹道状坠石-塑变砸坑、气体洞穴等构造;<br>成层, 纹层至厚层状, 火山口周围可厚达百<br>米, 向外迅速减薄; 多见于气水-岩浆相互<br>作用式喷发, 常为低于 100 的“冷湿粘<br>流” (低的水-岩浆比情况下为干热流), 常<br>与玛尔湖共生<br>位于碎屑流沉积之下, 属碎屑流前缘底部<br>的干热火山灰飓风沉积; 单向底形, 单层厚<br>常小于 1 m, 常见炭化木和小型喷气管 | 沿地表膨胀、涡动的低密度载屑蒸汽流<br>(气-固两相), 为扩散流; 形成于爆炸冲击<br>波、碎屑流前锋和喷发柱垮塌, 初始搬运速<br>度可达 500 m · s <sup>-1</sup> ; 形成低处厚、高处薄<br>的披盖式沉积; 单向底形, 发育低角度交错<br>层理、沙丘层理和爬升沙丘层理, 膨胀构造<br>和槽泊构造。与碎屑流相比, 其层薄、粒<br>细、分选好, 且波状或交错层理常见   |
| 增生火山砾, 单体  | (29) accretionary lapilli: 粒径 2 ~ 64 mm 火山灰球, 空心或实心、有核或无核。为喷发烟云中火山灰潮湿粘粒形成<br>(如同包元宵); 其成因可以是干火山烟云遇降雨, 火山蒸汽作用或其它过程。披甲火山砾 (核心直径大于包壳厚度)<br>是胶泥状火山灰围绕刚性碎屑粘粒而成        |   |   |   |
| 同生岩屑角砾/集块,<br>单体                                       | (30) cognate lithic lapilli/ block: 火山作用过程中形成或裹杂的外来岩块, 通常体积分数占岩石总体积 5% 以下; 有 3<br>种主要来源: (a) 岩浆房边缘缓慢冷凝结晶的岩浆“外壳”, (b) 火山通道边缘的围岩, (c) 喷出地表后的岩浆及其碎屑<br>流动过程中裹夹的先期岩屑 |   |   |   |

表 2(续)

| 成岩方式  | 岩相类型  | 成分及其特征  | 结构及其特征  | 成因和产状  |
|---|---|---|---|--|
| 沉火山碎屑岩<br>(火山碎屑体<br>积分数为<br>90%~<br>50%,压实<br>固结)tuffites | (31)单成分火山泥<br>流/拉哈(monolitho-<br>logic lahar)   | 典型成分为棱角状、次棱角状安山岩和英安岩角砾与火山灰级晶屑、岩屑混合物;单成分者直接源于火山喷发,复成分者源于火山垣坍塌;含炭化木者代表源于热碎屑流,搬运中冷却演变为 lahar;发育不规则状气孔(圈闭的气泡或蒸汽所致),孔径 1 mm 到大于 1 cm,于大颗粒或非渗透性碎屑层附近气孔变疏或加密 | 底部通常无侵蚀;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,取决于起伏地形,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。Lahar 顶部平整,局部可见胀隆和凹陷;粒度从泥到漂砾,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;低碎屑浓度形成正粒序,高碎屑浓度形成逆粒序;板状或长形碎屑平行流动面,杂乱、平行或近垂直于流向 | 拉哈为层流,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、高粘度岩浆(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,具有一定屈服强度的非牛顿流体,碎屑物占流体质量 80% 以上称为拉哈(80% 以下为洪水流);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有 3 类:(a)直接的,即,喷发物过水或落水(湖、雪、冰、雨)形成;(b)间接的,由地震或火山膨胀引发的;(c)无关的,后期降雨/融水导致的火山碎屑物再搬运。层流、对底面无侵蚀(有时可见其下的草地保存完好)是拉哈与冲积扇泥石流沉积的主要区别 |
|   | (32)复成分火山泥<br>流/拉哈(heterolitho-<br>logic lahar) |   |   |  |
|   | (33)岩石滑坡-山崩<br>沉积                               | rock slide-avalanche deposits:顶部丘状,百米宽,几十厘米厚;大块角砾岩化的山坡岩块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;基质中泥质组分多于拉哈;形成于火山期后;能干层与软弱层(如火山灰)互层,在洪水、地震等触发下形成          |   |  |
|   | (34)凝灰岩含煤                                       | 煤层多产于凝灰质砂砾岩、粉砂岩及泥岩与中细粒火山凝灰岩互层序列   | 煤层可见煤线,薄层至中厚层状;碎屑岩和凝灰岩层状,发育各种交错层理,常见硅化木(多顺层产出)  | 属于沼泽环境形成的再搬运的火山碎屑沉积岩。火山活动区高地热流、高钾有利于森林植被发育,气候适宜便大规模成煤。松辽盆地营城组二段发育多套工业煤层  |

注:该分类主要依据:a.松辽盆地和准噶尔盆地的露头 and 岩心资料;b.长白山(吉林)、五大连池(黑龙江)、火山岛(福建漳州)、湖光岩(广东湛江)、石山火山口(海南海口)等现代火山实地考察资料(部分实例如图版所示);c.参考文献[1-18],尤其是其中相关典型国外实例。纵横比(aspect ratio)指熔岩厚度除以与熔岩面积相等的圆的直径;低粘度岩浆(玄武岩为主)纵横比低( $1/100$ ),高粘度岩浆(流纹岩、英安岩、安山岩和粗面岩)纵横比高( $1/50$ )。脉岩本应为次火山岩,火山岩区的构造角砾岩属于于火山岩的改造岩,它们均不属于火山岩类;但考虑到它们在火山岩地区很常见,且与火山岩共生,为便于应用和对比故一并列入分类表。据文献[19]。据文献[20]。在碎屑熔岩(冷凝固结)和火山碎屑岩(压实固结)之间存在一系列过渡类型,上表没有给出其分类位置,主要是考虑简化和实用问题;在应用时采用“优势类型”原则,即以冷凝固结成岩为主则定为火山碎屑熔岩,以压实固结成岩为主则定为火山碎屑岩。国际地科联(IUGS)火成岩分类中<sup>[21]</sup>:火山碎屑岩(pyroclastic)指火山碎屑含量占岩石体积的 100%~75%,沉火山碎屑岩(tuffites)指火山碎屑占岩石体积的 75%~25%,沉积碎屑岩(epiclastic)指火山碎屑占岩石体积的 25%~0%,即,前两者的界线定为 75%。考虑到我国盆地火山岩发育层段(断陷期)火山碎屑岩常占统治地位,各种类型的火山碎屑(新生、同源、附生再旋回)往往是碎屑成分的主体,所以采用 90%和 50%分界( $<50%$  为沉积碎屑岩),这样也符合“少前多后、主要组分作为基本名称”这一命名原则。

又有改造,某些组分减少并逐渐消失,而另些组分相对增加。了解这些变化过程及其结果,对盆地火山岩及其储层和油气藏研究至关重要。笔者基于松辽盆地(中生界中酸性岩为主)、准噶尔盆地(古生界中基性岩为主)和现代火山岩考察并结合国内外相关文献,归纳总结火山喷出物的变化规律如下。

## 2.1 形成与保存问题 1:现代火山喷出物与古火山保存物的同一性

具有较好继承性或保存完好的火山岩主要为各种熔岩和角砾熔岩类。这可能是由于这些火山岩骨架坚硬、不易破碎、流体不易大规模渗滤、整体抗风化能力强。

**厚层熔岩** 是溢流相或喷溢相熔岩,相当于英文文献中的大型粘滞流熔岩(coherent massive lava/

flow),成分包括基性、中性、酸性和碱性岩;或洪泛玄武岩(flood basalt),多指基性岩<sup>[7, 24-26]</sup>。它们是现代火山岩台地的主体,如夏威夷岛和长白山区溢流状玄武岩类是其玄武岩台地的主体<sup>[1, 6]</sup>。它们也是古火山岩分布区的主要岩石类型,如松辽盆地营城组火山岩大约 50% 为该熔岩<sup>[27]</sup>。由此说明,厚层熔岩具有很好的整体保存性,即,它们在长期的地质历史时期可能经历各种地质作用的改造;但作为岩层整体它们经常能够完好保存,且能够反映其原始喷发面貌。

**熔结结构的角砾熔岩与集块熔岩** 该类岩石经常与火山碎屑岩过渡或与熔岩过渡。前者构成火山碎屑岩中的能干层,在碎屑岩被部分剥蚀时它们往往由于质地坚硬而得以保存(岩层可能发生变动);

后者与熔岩浑然成一体,作为熔岩组合得以完好保存。

**柱状节理熔岩** 这是现代火山和古火山中都常见的很具视觉冲击力的火山景观。现代实例比比皆是,古火山如松辽盆地白垩系流纹岩<sup>[28]</sup>和准噶尔盆地石炭系玄武岩(图版 C)。

**枕状熔岩** 现代洋中脊 2 500 m 以下的深水区正在形成状如千手观音的枕状熔岩(twenty thousand leagues under the sea)<sup>[8]</sup>。另一方面枕状熔岩作为蛇绿混杂岩序列(超铁镁质岩-铁镁质/超铁镁质堆晶岩-岩墙群-枕状熔岩-深海沉积)顶部组分<sup>[26]</sup>,在古火山岩中能够很好保存。

**黑耀岩-珍珠岩-松脂岩** 在松辽盆地周缘和准噶尔盆地周缘有许多珍珠岩矿开采区,在松辽盆地内部钻井岩心中也常见珍珠岩类<sup>[29-30]</sup>;在松辽盆地东南隆起区可见珍珠岩呈透镜状和团窝状与膨润土(火山灰蚀变产物)共生,保持原生组合特点<sup>[31-32]</sup>。这说明玻璃质火山岩类及其蚀变产物(松脂岩)不仅能够地质历史中得以长期保存,而且对其原始喷发关系具有很好的继承性。

**角砾熔岩** 角砾岩化作用在火山岩形成演化过程中普遍存在;其实,不含角砾的火山岩是很少的。这就是为什么在分类表中将“熔岩基质中分布的火山碎屑 < 10%、冷凝固结”的火山岩定义为火山熔岩(不以体积 10% 为界限则都成角砾熔岩了)。它们中的堆砌角砾岩、隐爆角砾岩和熔结角砾岩等,由于自身坚硬且有围岩保护,所以在地质历史中通常能够长期完好保存。

## 2.2 形成与保存问题 2:现代火山喷出物与古火山保存物的差别

在松辽盆地火山岩油气勘探初期,人们曾把浮岩这样的多孔火山岩作为主要的寻找目标。但经过几年的探索后发现,在白垩系埋藏火山岩中几乎找不到浮岩类。究其原因可能主要归咎于保存和改造两个方面:就保存而言,在喷发时间和重力分异的共同作用下,浮岩主要位于一个喷发旋回堆积体的顶部和边部,易于剥蚀,难以被埋藏保存;就改造而言,浮岩这类多孔火山岩,由于其孔隙度高(浮岩孔隙度 > 60%)、岩石骨架单薄,在埋藏过程中会发生压实变形和孔隙充填等后生成岩作用,最终导致古火山保存物与原始喷发物之间的巨大差异。这类情况有以下几种。

**浮岩** 现代火山极发育,可形成于各种火山岩。

例如,在我国的长白山和五大连池地区浮岩不仅是重要的喷出物类型<sup>[32]</sup>,而且常见顺流而下漂浮在水面的浮岩(当地人称之为江石沫)。而笔者在对松辽盆地白垩系火山岩和准噶尔盆地石炭系火山岩研究中,无论剖面露头还是钻井岩心,都没有识别出典型的浮岩。由此认为浮岩在古火山机构中几乎无保存。

**渣状熔岩** 现代火山极发育,古火山仅见部分保存。这里所说的部分保存指两方面:首先,作为渣状熔岩的一系列堆积体,位于下部的、在喷发主期已经被埋藏的那些往往能够保存下来;其次,即便是被保存,它们在后期的埋藏、抬升等过程中通常都经历了孔隙充填和蚀变改造,致使其保存面貌与原始状态有显著性差异。松辽盆地营城组一段下部和营城组三段中部,准噶尔盆地东缘五彩城石炭系巴塔玛依内山组底部,都可以见到这种部分保存的渣状熔岩。

**绳状熔岩和涌浪状熔岩** 现代火山常见,古火山难以识别。一些西方学者将它们归为洪泛玄武岩序列的顶部层系<sup>[6]</sup>。它们确实主要表现为层面构造;但实际上,这种极低粘度的玄武岩浆往往发育于大型火山旋回的早期,它们在后期的暴露-风化、剥蚀-改造和后续熔岩流的侵蚀-焊接等作用下,其层面特征往往难以识别,常表现为多期熔岩流的垂向叠置,其间的界面是模糊难以识别的。

**块状熔岩** 现代火山常见,古火山部分保存并经圆化改造和胶结。具有各种层面和层内构造的、原地或少许位移的大型火山岩集块堆积体,是现代火山景观。然而在古火山岩组合体中却不常看到。笔者在松辽盆地和准噶尔盆地盆缘剖面仅见少数实例,可与之类比。一是于松辽盆地东南隆起区三台珍珠岩体外层,发育一套称之为侵出相外带亚相的集块岩<sup>[30]</sup>,其特征与美国俄勒冈州的全新世 Newberry 大黑耀岩火山相似<sup>[7]</sup>;二是准东金山沟剖面石炭系集块玄武岩(图版 H)。两实例都为致密胶结的集块岩,且其角砾的锋利程度明显变弱。

## 2.3 同生改造和保存识别问题:火山垮塌作用

火山喷出物堆积体的改造贯穿于火山岩形成演化的始终。除火山泥石流、滑坡等火山期后改造外,火山喷发期堆积物的改造也十分普遍,这在很大程度上使火山物质原生保存与识别的问题更加复杂化。同生改造在这里指火山喷发期熔岩或火山碎屑沉积物的再搬运,主要表现为垮塌作用,包括熔岩穹

隆垮塌、熔岩流垮塌和火山碎屑堆垮塌。垮塌作用主要发生在火山喷发聚集物的陡坡,中酸性火山作用中熔岩流垮塌更常见。当不断生长的熔岩穹隆或熔岩流从其顶峰或火山侧翼的高点垮塌时,便形成富含折断熔块的破碎熔岩流或二次火山碎屑流。这种垮塌流可以是纯的重力流或定向爆炸式的冲击波,但二者兼有更常见。单个垮塌堆积物通常体积较小( $< 1 \text{ km}^3$ ),但由于火山喷发期垮塌作用频繁出现、堆积物彼此叠置,最终可能会形成较大的复合堆积体。其特点是少含或不含新生塑性浆屑、无秩序堆积,垮塌碎屑种类多样,从集块-灰流到火山碎屑流沉积都有发育。由于是再搬运的改造型沉积,在搬运过程中常与先前冲积物混合,因此,在许多情况下难以将其与外生碎屑流沉积(epiclastic debris flow)分开。在松辽盆地东南缘营城组标准剖面官马山东南坡,发育多套熔浆胶结复成分砾岩<sup>[33]</sup>,它们是官马山东南坡的重要组成部分,多呈“无根复成分砾岩”(即大块砾岩体之下难以找到确切的原岩层),其成因应与这种同生或火山期后垮塌作用有关。笔者归纳这类同生垮塌堆积的识别特征为:成分多样但以火山碎屑为主,胶结类型多样包括熔浆胶结、凝灰质和砂泥质胶结,夹于典型火山成因序列之中,但又难以见到与之紧邻的确切原岩层,发育于火山机构斜坡或坡角处、属于近火山口相带。有学者指出,这类垮塌堆积通常是热就位的,故其热剩磁及其定向性是将其与沉积碎屑流区分的标志<sup>[34-35]</sup>。

#### 2.4 关于中心式喷发和裂隙式喷发

现代玄武岩浆喷发有裂隙式和中心式两种。裂隙喷发系统规模巨大(通常延长 $> 100 \text{ km}$ ),常形成洪泛玄武岩。中心式喷发表现为各种规模的(通常较小)熔岩和火山渣锥,常显一定程度的对称性。然而,一系列较小规模的中心式喷发往往都与相关的裂隙系统有关,甚至大型火山翼部的放射状/环状裂隙(交汇处)会成为后续的火山喷发口(图版B)。许多火山喷发起初都沿着大型裂隙带分布,然后迅速集中于较少的几个“节点”发育。在地质历史中,沿着裂隙的一系列中心式喷发是普遍规律。即,当考察单个火山岩体时,它往往可以归属于中心式喷发;但当把时间跨度拉长(几到十几百万年)考察一系列火山机构时就会发现,它们往往是沿着某些区域深大断裂分布的。在松辽盆地东缘营城组火山岩发育区,火山岩与断裂关系的基本规律为:首先,火山岩群沿着区域深大断裂(佳—伊断裂、四平—哈尔滨断

裂)分布;其次,火山口往往在区域断裂与次级断裂的交汇部位集中发育<sup>[36]</sup>。

#### 2.5 关于火山碎屑流(pyroclastic flow)和火山碎屑涌浪(pyroclastic surge)

它们在现代火山和火山灾害研究中涉及最多,也是很令人困惑的火山产物,早期被称之为炽热火山云(nuée ardente)。Cas and Wrihtg<sup>[7]</sup>根据火山碎屑物搬运方式将其分成空落、流动和涌浪3类;从火山碎屑搬运和就位机理的角度,该分类的系统性强且易于理解,故表2分类方案中吸纳了这一分类思想。Schmincke<sup>[8]</sup>认为火山碎屑流由两部分组成:下部为贴地雪崩流(ground-hugging avalanche,碎屑搬运的主体),浮于其上的是细粒火山灰云浪(billowing cloud)。前者相当于表2的火山碎屑流,后者相当于涌浪。Fisher and Schmincke<sup>[2]</sup>指出,火山碎屑流为热的气体-碎屑密度流,可分为火山碎屑流(狭义,高密度、半液化,层流)和火山碎屑涌浪(低密度,紊流)。同时指出它们在许多情况下是同源的,只是在流动过程中由于重力分异或液化或流速不同而分化为不同流体,其沉积物在结构构造和产状方面有许多相同或相似之处。稍明显的区别是,火山碎屑流分选差,涌浪沉积分选较好。在盆地火山岩研究中,在岩心尺度上区分这两种火山碎屑沉积显然是困难的。然而,由于它们具有相同或相似的岩性和物性,物性随埋深的变化规律也相同,因此,这种区分上的困难对储层研究影响不大。尽管如此,由于两种碎屑流沉积的准确区分有助于岩相分析和古火山机构及其喷发类型的再造,笔者因此建议,在盆地火山岩研究中若据粒度分布和其它组构特征能够将它们分开时则尽量区分;但多数情况下是难以区分的,此时则可统称为非熔结火山碎屑流沉积(unwelded pyroclastic flow deposits);这时的岩性对应于(非熔结或正常的)火山碎屑岩(包括凝灰岩、角砾岩和集块岩)<sup>[24]</sup>,岩相相当于热基浪亚相<sup>[34]</sup>。这样既表示它们均为气-固密度流搬运,又表示都为压实固结成岩<sup>[37-38]</sup>。这样也能区别于熔浆搬运、凝固固结成岩的熔结结构火山碎屑(熔)岩(welded pyroclastic flow deposits, ignimbrite/agglutinate)。

本文获“东北亚生物演化与环境教育部重点实验室”、吉林大学“211”工程三期建设项目和2009年教育部基本科研业务经费(“吉林大学创新团队发展计划”)支持。孙晓猛、刘万洙、郑常青、张斌、张建

光、郎元强、高有峰、张东宁等 20 余人参加了野外和资料整理工作。与刘祥教授的野外现场研讨使作者受益匪浅。

#### 参考文献(References):

- [1] 刘嘉麒. 中国火山[M]. 北京: 科学出版社, 1999.  
LIU Jia-qi. Chinese volcanoes [M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [2] Fisher R V, Schmincke H U. Pyroclastic rocks[M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 1984.
- [3] Stewart A L, McPhie J. Facies architecture and Late Pliocene-Pleistocene evolution of a felsic volcanic island, Milos, Greece [J]. Bull Volcanol, 2006, 68: 703-726.
- [4] Busby C J, Bassett K N. Volcanic facies architecture of an intra-arc strike-slip basin, Santa Rita Mountains, Southern Arizona [J]. Bull Volcanol, 2007, 69: 85-103.
- [5] Gamberi F. Volcanic facies associations in a modern volcanoclastic apron (Ipari and vulcano offshore), Aeolian island arc [J]. Bull Volcanol, 2001, 63: 264-273.
- [7] Cas R A F, Wright J V. Volcanic successions [M]. London: Allen & Unwin, 1987.
- [8] Schmincke H U. Volcanism [M]. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2004.
- [9] Nault J. Volcanoes: power and magic [M]. Hagen: Könnemann, 2001.
- [10] Brown D J, Bell B R. Debris flow deposits within the Paleogene lava fields of NW Scotland: evidence for mass wasting of the volcanic landscape during emplacement of the Ardnamurchan central complex [J]. Bull Volcanol, 2007, 69: 847-868.
- [11] Luckow H G, Pavlis T L, Serpa L F, et al. Late Cenozoic sedimentation and volcanism during transtensional deformation in Wingate Wash and the Owlshhead Mountains, Death Valley [J]. Earth-Science Reviews, 2005, 73: 177-219.
- [12] Mee K, Tuffen H, Gilbert J S. Snow-contact volcanic facies and their use in determining past eruptive environments at Nevados de Chillan volcano, Chile [J]. Bull Volcanol, 2006, 68: 363-376.
- [13] Monecke T, Gemell J B, Herzig P M. Geology and volcanic facies architecture of the Lower Ordovician Waterloo massive sulfide deposit, Australia [J]. Economic Geology, 2006, 101: 179-197.
- [14] Moss S, Russell J K, Andrews G D M. Progressive infilling of a kimberlite pipe at Diavik, Northwest Territories, Canada: insights from volcanic facies architecture, textures, and granulometry [J]. J Volcanol Geotherm Res, 2008(174): 103-116.
- [15] Palinka L A, Bermanec V, Sostaric S B, et al. Volcanic facies analysis of a subaqueous basalt lava-flow complex at Hruskovec, NW Croatia: evidence of advanced rifting in the Tethyan domain [J]. J Volcanol Geotherm Res, 2008(178): 644-656.
- [16] Paulick H, Breitreuz C. The Late Paleozoic felsic lava-dominated large igneous province in Northeast Germany: volcanic facies analysis based on drill cores [J]. Int J Earth Sci (Geol Rundsch), 2005, 94: 834-850.
- [17] Paulick H, Vanko D A, Yeats C J. Drill core-based facies reconstruction of a deep-marine felsic volcano hosting an active hydrothermal system (Pual Ridge, Papua New Guinea, ODP Leg 193) [J]. J Volcanol Geotherm Res, 2004(130): 31-50.
- [18] Rey S S, Planke S, Symonds P A, et al. Seismic volcano stratigraphy of the Gascoyne margin, Western Australia [J]. J Volcanol Geotherm Res, 2008(172): 112-131.
- [19] 郑常青, 徐正顺, 王璞珺, 等. 松辽盆地东南隆起区白垩系营城组火山岩中辉绿玢岩脉地质特征及其储层意义 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(6): 1097-1103.  
ZHENG Chang-qing, XU Zheng-shun, WANG Pu-jun, et al. Geological characteristics and hydrocarbon reservoir significance of the diabase porphyrite at the Shanghewan area, southeast uplift of the Songliao basin, NE China [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1097-1103.
- [20] 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.
- [21] Le Maitre R W, Bateman P, Dudek A, et al. A classification of igneous rocks and glossary of terms [M]. London: Blackwell, 1989.
- [22] 王璞珺, 庞颜明, 唐华风, 等. 松辽盆地白垩系营城组古火山机构特征 [J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2007, 37(6): 1064-1073.  
WANG Pu-jun, PANG Yan-ming, TANG Hua-feng, et al. The characteristics of the paleo-volcanic edifice of Yingcheng Formation, Cretaceous, Songliao basin

- [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1064-1073.
- [23] Wanke A, Melezhi V. Sedimentary and volcanic facies recording the Neoproterozoic continent breakup and decline of the positive  $^{13}\text{C}$  carb excursion[J]. Precambrian Research, 2005, 140:1-35.
- [24] 王璞珺, 郑常青, 舒萍, 等. 松辽盆地深层火山岩岩性分类方案[J]. 大庆石油地质与开发, 2007, 26(4): 17-22.  
WANG Pu-jun, ZHENG Chang-qing, SHU Ping, et al. Classification of deep volcanic rocks in Songliao basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2007, 26(4): 17-22.
- [25] Corcoran P L. Recognizing distinct portions of seamounts using volcanic facies analysis: examples from the Archean Slave Province, NWT, Canada [J]. Precambrian Research, 2000, 101: 237-261.
- [26] Bear A N, Cas R A F. The complex facies architecture and emplacement sequence of a Miocene submarine megapillow lava flow system, Muriwai, North Island, New Zealand[J]. J Volcanol Geotherm Res, 2007(160): 1-22.
- [27] 王璞珺, 吴河勇, 庞颜明, 等. 松辽盆地火山岩相: 相序、相模式与储层物性的定量关系[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2006, 36(5): 805-812.  
WANG Pu-jun, WU He-yong, PANG Yan-ming, et al. Volcanic facies of Songliao basin: sequence, model and the quantitative relationship with porosity & permeability of volcanic reservoir[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2006, 36(5): 805-812.
- [28] 李金龙, 王璞珺, 郑常青, 等. 松辽盆地东南隆起区营城组柱状节理流纹岩特征和成因[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(6): 1131-1138.  
LI Jin-long, WANG Pu-jun, ZHENG Chang-qing, et al. Characteristics and genesis of rhyolite with columnar joints from the Yingcheng Formation in southeastern uplift of the Songliao basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1131-1138.
- [29] Jackson J A. Glossary of geology [M]. 4th ed. Virginia: American Geological Institute, 1997.
- [30] 单玄龙, 刘青帝, 任利军, 等. 松辽盆地三台地区下白垩统营城组珍珠岩地质特征与成因[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(6): 1146-1151.  
SHAN Xuan-long, LIU Qing-di, REN Li-jun, et al. Geological characteristics and genesis of perlite in the Lower Cretaceous Yingcheng Formation in Santai area of the Songliao basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1146-1151.
- [31] 许中杰, 刘万洙, 丁日新, 等. 九台营城煤矿珍珠岩特征、成因及储层地质意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(6): 1139-1145.  
XU Zhong-jie, LIU Wan-zhu, DING Ri-xin, et al. Perlite in Yingcheng coal mine, Jiutai: characteristics, formation and reservoir significance [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1139-1145.
- [32] 白雪峰, 刘万洙, 舒萍, 等. 松辽盆地东南隆起区营城组火山岩蚀变改造型膨润土类型、特征及分布规律——以九台市膨润土矿为例[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(6): 1244-1250.  
BAI Xue-feng, LIU Wan-zhu, SHU Ping, et al. Type, genesis and distribution regularities of the bentonite of volcanic rock-altered and reformed type in the Yingcheng Formation in the southeastern uplift of the Songliao basin: take Juitai bentonite deposit as an example [J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1244-1250.
- [33] 刘万洙, 邵锐, 白雪峰, 等. 松辽盆地东南隆起区营城组一段熔浆胶结复成分砾岩特征及其成因分析[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(6): 1124-1130.  
LIU Wan-zhu, SHAO Rui, BAI Xue-feng, et al. Characteristics and genetical study of the magmacemented polyimictic conglomerate in the Cretaceous Yingcheng Formation, southeastern uplift area of the Songliao basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6): 1124-1130.
- [34] Siebert L. Large volcanic debris avalanches: characteristics of source areas, deposits and associated eruptions[J]. J Volcanol Geotherm Res, 1984(22): 163-197.
- [35] Blanco-Montenegro I, Ritis R D, Chiappini M. Imaging and modelling the subsurface structure of volcanic calderas with high-resolution aeromagnetic data at Vulcano (Aeolian Islands, Italy) [J]. Bull Volcanol, 2007, 69:643-659.
- [36] 孙晓猛, 朱德丰, 郑常青, 等. 松辽盆地东缘中生代断裂构造特征、形成期次及其储层意义[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2007, 37(6): 1055-1063.  
SUN Xiao-meng, ZHU De-feng, ZHENG Chang-qing, et al. Feature, epoch and reservoir significance of the Mesozoic faults at the eastern margin of the

- Songliao basin[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2007, 37(6):1055-1063.
- [37] 刘祥, 向天元. 中国东北地区新生代火山和火山碎屑堆积物资源与灾害[M]. 长春: 吉林大学出版社, 1997.
- LIU Xiang, XIANG Tian-yuan. Cenozoic volcanoes and pyroclastic deposits in Northeastern China: resources and hazard [M]. Changchun: Jilin University Press, 1997.
- [38] 王璞珺, 迟元林, 刘万洙, 等. 松辽盆地火山岩相: 类型、特征和储层意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2003, 33(4): 317-325.
- WANG Pu-jun, CHI Yuan-lin, LIU Wan-zhu, et al. Volcanic facies of the Songliao basin: classification, characteristics and reservoir significance[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2003, 33(4): 317-325.
- D. 枕状玄武岩, 玻璃质, 边缘绿泥石化, 新疆金山沟, C<sub>2</sub> 巴塔玛依内山组;
- E. 甬道形块状玄武岩, 五大连池, Q 玄武岩;
- F. 绳状玄武岩, 凸向流动方向, 表面拔丝的延长方向垂直绳长轴、与流向平行, 五大连池, Q;
- G. 汹浪状玄武岩, 见外壳 a、内壳 b、内核 c、外核 d 4 层结构, 前缘断裂呈块状, 五大连池, Q;
- H. 集块岩(玻璃质结构)及其上覆厚层粘滞流, 安山岩(黄灰色), 新疆金山沟, C<sub>2</sub> 巴塔玛依内山组;
- I. 堆砌角砾岩(英安质), 原地角砾, 熔浆胶结, 火山颈亚相, 营城煤矿, K<sub>1</sub> 营城组;
- J. 隐爆角砾岩, 原岩被炸碎, 原地角砾, 枝杈状裂隙, 岩汁充填胶结, 营城煤矿, K<sub>1</sub> 营城组;
- K. 原生火山碎屑流沉积, 柱状者为火山喷气管, 含钙流体使其胶结较好, 长白山, Q 玄武质火山碎屑岩;
- L. 基浪和空落沉积, 平行和粒序层理, 弹道状坠石自左向右落下, 韩国济州岛, Q 玄武质火山碎屑岩;
- M. 构成火山垣的熔岩滴和火山渣, 可见气孔自内向外由大变小的分带现象, 海口石山, Q 玄武岩;
- N. 菜花状火山弹(球泡), 为岩浆于地下较浅处遇水爆炸形成, 营城煤矿, K<sub>1</sub> 营城组流纹岩;
- O. 安山质集块岩(古火山渣锥)、断层面、构造角砾岩带及其绿泥石化, 石场二队, K<sub>1</sub> 营城组

### 图版说明

- A. 岩浆溢流口和扇状熔岩被, 福建漳州火山岛, Q 玄武岩;
- B. 火山口及其环状和放射状裂隙, 福建漳州火山岛, Q 玄武岩;
- C. 柱状节理玄武岩, 新疆双井子, C<sub>2</sub> 巴塔玛依内山组;

图版

