

黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山空落堆积物形成机制研究

郭磊,刘永顺,聂保锋,黄志聪,侯鹏,李耀,郭可欣

首都师范大学资源环境与旅游学院,北京,100048



内容提要:火山碎屑物的粒度、粒形和分布特征蕴含着其形成机制和喷发的环境信息。基于镜泊湖地区蛤蟆塘火山的一个空落堆积剖面的野外地质和岩相学,以粒度分析和分形理论定量研究了火山碎屑物的粒度分布、粒形几何及其分形特征。蛤蟆塘火山空落碎屑粒度分布均为单峰式,由岩浆爆炸形成的空落浮岩粒度峰值较小,而由射气岩浆喷发形成的含细花岗岩碎屑夹层的碎屑粒度峰值较大。空落浮岩颗粒的类球度、长宽比和凸度都小于含细花岗岩碎屑夹层的数值,表明空落浮岩颗粒相对不规则的特点。利用多段幂律方法拟合了蛤蟆塘火山空落碎屑颗粒分布规律,发现空落浮岩颗粒存在四个幂律分布段(即对应四个分形维数),这是由于岩浆初始破碎、火山通道内的二次破碎以及风力筛选作用等造成的;含细花岗岩碎屑夹层的碎屑分布有两个幂律分布段(对应两个明显不同的分形维数),即浮岩和花岗岩碎屑的形成是因不同破碎机制造成的。

关键词:蛤蟆塘火山;空落堆积物;粒度粒形分析;分形维数;形成机制

火山喷发空落堆积物为火山碎屑物在喷发气流和大气气流的作用下,直接遵循弹道轨迹快速降落至地表,或经风力搬运一段距离后在重力作用下依其沉降速度大小先后降落至地面而形成的堆积物(刘祥,1996;陈建文等,2000)。空落火山碎屑物的堆积构造和序列、岩相和气孔结构、粒度和粒形的研究,可了解火山喷发的动力学过程和预测未来的火山喷发灾害提供线索(于红梅等,2008,2011; Miyabuchi et al., 2018)。其中,粒度和粒形分析是对火山碎屑物进行量化处理的重要手段。除了传统的筛分和激光衍射法外,快速高效且不受筛分径级限制的动态图像量化分析方法逐渐被运用于火山学(Paredes-Mariño et al., 2017; Buckland et al., 2021)。火山碎屑物的粒度特征可用于判别火山碎屑物的成因(Walker, 1971, 1983),也可用于指示火山爆炸强度和碎屑物的搬运过程(刘强等,2009;赵波等,2010),火山碎屑物的粒形特征反映了火山喷发过程中的岩浆破碎机制,影响着颗粒的最终沉降速率(Riley et al., 2003; 于红梅等,2011; Liu et al., 2015; Saxby et al., 2020)。天然和实验数据表明,火山爆炸产生的火山碎屑粒度分布遵循幂律规

律,分形维数可用于量化粒度分布和爆炸强度(张秉良等,2005; Kueppers et al., 2006; 白志达等,2006; Perugini et al., 2011; Colo' et al., 2020)。但火山碎屑的形成往往受多重机制的复杂控制,其粒度分布也不完全代表岩浆初始破碎的结果,因而有时需要以多种幂律规律对粒度分布进行拟合(Jones and Russell, 2017; Paredes-Mariño et al., 2017, 2019)。将火山碎屑的粒度分布以多种幂律关系进行拟合,并结合其粒形特征对火山碎屑物形成机制进行分析的结果,更符合火山实际喷发过程。

进入全新世和现代,火山活动以爆发为主的我国东北地区火山群普遍形成过空落火山碎屑堆积(刘祥等,1999,2011)。前人对龙岗火山群和长白山天池火山群的空落堆积物均已做出过较为详细的粒度研究(白志达等,2006;刘强等,2009;赵波等,2010;于红梅等,2008,2011,2012;王禹钦等,2019),但研究方法大多数仍为传统的筛分方法,以分形维数对碎屑物形成方式进行研究时多以单一幂律拟合来分析(张秉良等,2005;白志达等,2006;于红梅等,2008),动态图像分析的方法仅被用于粒形统计(于红梅,2013)。对镜泊湖地区蛤蟆塘火山群空落堆

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号:41372343,40872062)的成果。

收稿日期:2022-03-17;改回日期:2022-08-26;网络首发:2022-09-20;责任编辑:章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.055

作者简介:郭磊,女,1997年生,硕士研究生,自然地理学专业;Email: 15732188797@163.com。通讯作者:刘永顺,男,1966年生,博士,副教授,主要从事火山学、岩石学、地质流体力学和地质系统复杂性科学研究;Email: cnu901@126.com。

积物的研究较少,只停留在对堆积剖面和碎屑颗粒形态和粒径的描述上。蛤蟆塘火山空落碎屑堆积可达数米厚(樊祺诚等,2003),张招崇等(2001)考察发现黑色的火山渣直接覆盖在花岗岩基岩之上,部分被后期的熔岩覆盖,并把在火山渣中发现的细粒花岗岩碎屑夹层定义为风化砂沉积夹层。陈洪洲等(2005)认为该夹层为岩浆接触到地表或近地表水体发生射气岩浆喷发导致围岩爆炸、崩解的产物。本文选择了蛤蟆塘 11 号火山口西南浮石采场中的

一个剖面,运用野外测量、显微观察和粒度动态图像分析方法,对其空落碎屑物的岩相、粒度和粒形特征进行了研究,并以多段幂律方式对其粒度分布进行了拟合,分析了蛤蟆塘地区空落堆积物特征及其形成机制。此研究对了解爆炸性火山喷发动力过程、喷发产物破碎和就位机制以及预测爆炸性火山喷发灾害提供了新案例。

1 镜泊湖地区区域地质背景

镜泊湖地区位于黑龙江省宁安市,地处东西向的中亚造山带东部,敦化—密山断裂带西侧,吉黑海西晚期褶皱带上,古新世至全新世火山活动频繁(张招崇等,1999)。在始新世至全新世期间,该地发生了从超大规模的俯冲带到大陆裂谷构造环境的变化(Okamura et al., 2005)。镜泊湖全新世火山喷发受敦化—密山断裂及其次一级断裂控制,活动时间为 5.2~5.5 ka BP,形成了位于长汀—大干泡深断裂上的火山口森林、大干泡、五道沟、迷魂阵、蛤蟆塘 5 个喷发中心,10 余座火山。

本文研究的蛤蟆塘火山群由 11 号火山口和 12 号火山口组成,主要是斯通博利型喷发。最初喷发产生的黑色火山渣直接覆盖在印支期花岗岩之上,火山渣堆积中可见含细花岗岩碎屑的夹层。黑色火山渣被后期薄层熔岩和空落堆积物层(火山弹、熔岩饼、渣状火山砾)所覆盖(张招崇等,2001),其岩性均为响岩质碱玄岩(图 1)。

2 火山碎屑堆积剖面野外地质特征

本次研究的浮石采场位于蛤蟆塘 11 号火山口西南侧,距离火山口约 1.2 km(图 2a—c)。火山锥坡主要为亮黑色、亮黑紫色、亮黑蓝色泡沫状气孔构造的火山浮岩和火山弹松散堆积。浮岩手标本呈黑色,气孔构造十分发育。火山浮岩大小不一,较大的浮岩中可见规则的圆形气孔,部分浮岩含有金云母捕虏晶。火山锥坡上可见大的花岗岩原生露头。

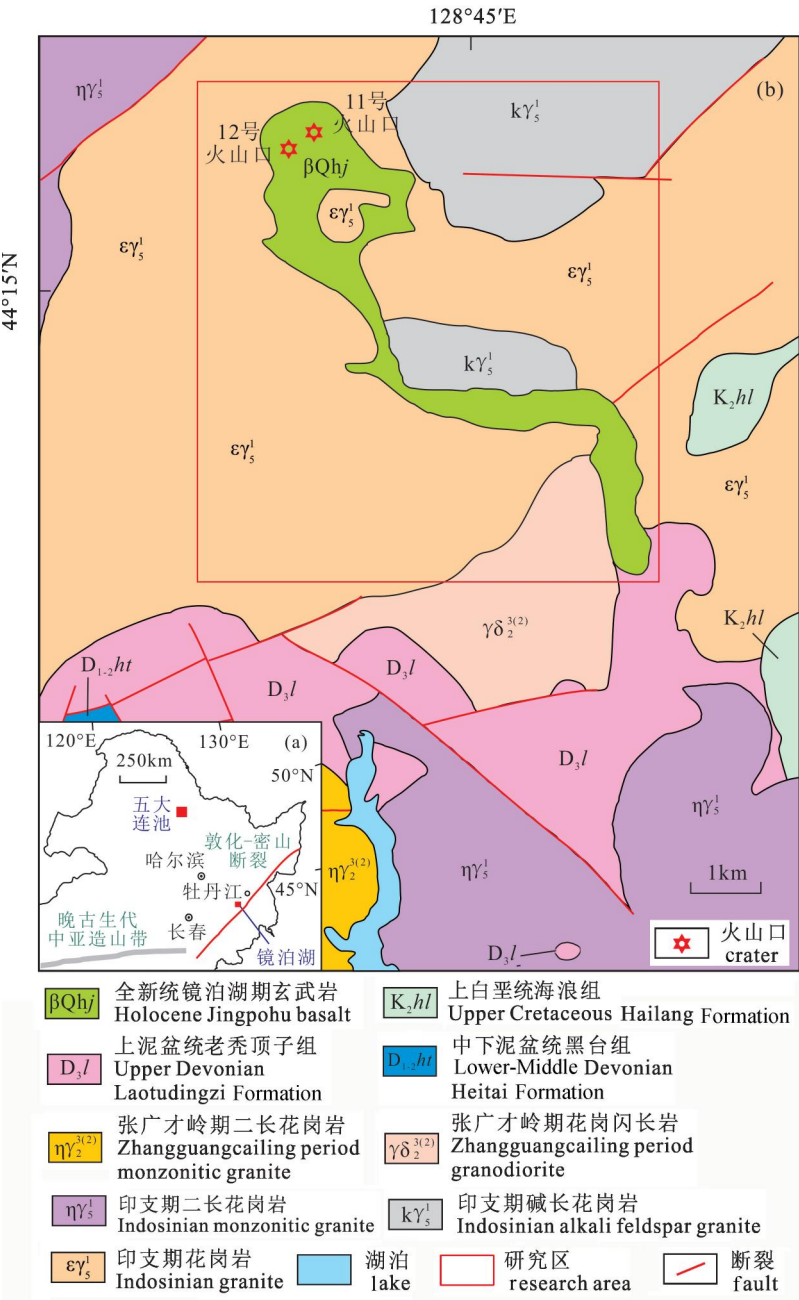


图 1 黑龙江及邻省地理简图(a)和黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山区地质图(b)
Fig. 1 Geographical map of Heilongjiang and surrounding areas (a) and geological map of Hamatang volcano area, Jingpo Lake area, Heilongjiang (b)

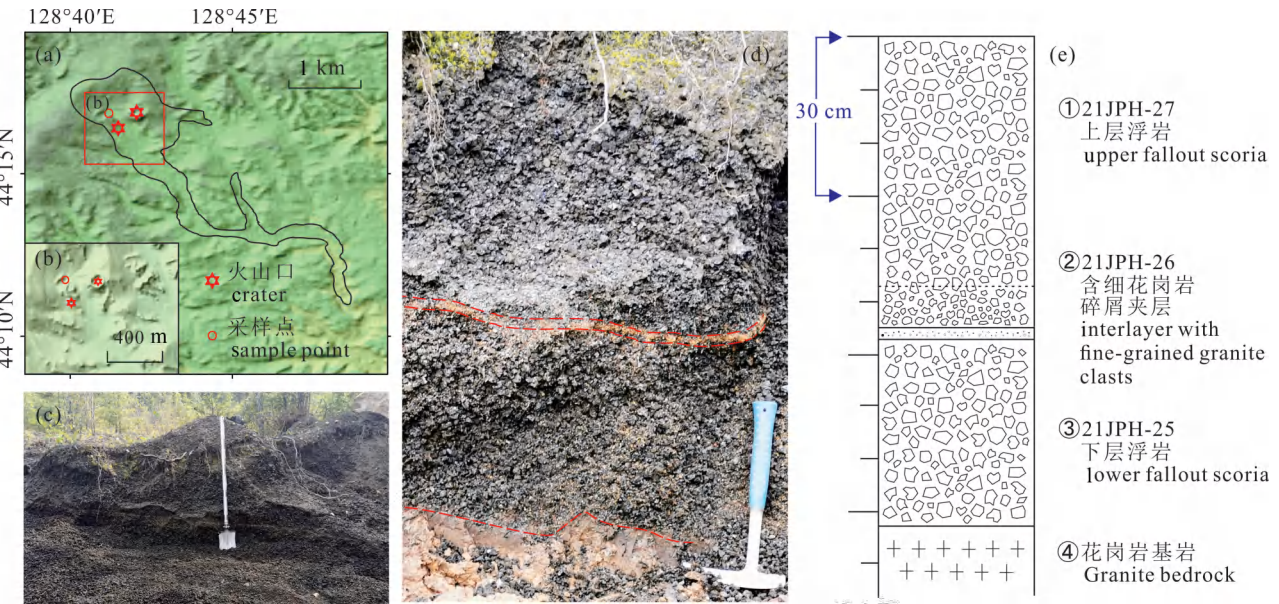


图 2 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山浮石采样野外照片和火山碎屑堆积剖面图:(a)、(b) 蛤蟆塘火山口和采样点的示意地形图;(c) 采样点野外照片;(d) 剖面野外照片;(e) 剖面地层柱状图

Fig. 2 Field photos of the pumice quarry and stratigraphic section of pyroclast deposit in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang: (a), (b) Schematic topographic map of Hamatang crater and sampling point; (c) field photo of sampling point; (d) field photo of section; (e) stratigraphic histogram of section

本次研究选择了浮石场内一个剖面,剖面层序特征如下(图 2d、e):

- (1)上层黑色浮岩层:此层厚度约 55 cm,颗粒粒径主要为 1~15 mm,具有弱的逆粒序特点。其下部 8 cm,碎屑颗粒明显较上层变小,粒径 1 cm 以内。采样 21JPH-27。
- (2)含黄色细花岗岩碎屑夹层:层厚 2 cm,颗粒粒径主要为 0.5~10 mm。1~5 mm 的颗粒体积约占 60%,小于 1 mm 颗粒占 30%左右,黄色细花岗岩碎屑中掺杂着细粒黑色火山砂、火山砾,颗粒大小与花岗岩碎屑相近,该层与上下两浮岩层之间界线较为分明。采样 21JPH-26。
- (3)下层黑色浮岩层:厚约 35 cm,颗粒粒径主要为 1.5~15 mm。小于 5 mm 的颗粒体积约占 30%,5~10 mm 的颗粒体积约占 50%,个别浮岩颗粒较大,20~25 mm 左右,体积约占 3%左右。采样 21JPH-25。
- (4)花岗岩基岩:表层风化,肉红色到黄色印支期花岗岩,块状构造,未见底。

3 研究方法

3.1 动态图像分析方法

动态图像法可在短时间内为碎屑物建立粒度粒

形数据库(王有鹏等,2019),逐渐被应用于火山学研究当中。CAMSIZER 是以数字动态图像分析技术对样品的粒度和粒形特征进行分析和统计处理的实验仪器,可对 30 μm ~30 mm 的颗粒大小和形态进行较为精准的分析。样品从仪器的振动进料通道进料,在软件 CAMSIZER Microtrac Retsch 的控制下调整进料速度,以避免测量区域中的颗粒聚集。当颗粒落入测量区域时,颗粒会被两个数码相机以每秒 60 帧的速率捕获二维投影。基本相机 (CCD-B) 负责捕获大颗粒(尺寸范围 300 μm ~30 mm),变焦相机 (CCD-Z) 负责捕获小颗粒(尺寸范围 30 μm ~3 mm)。CAMSIZER 可对捕获到的颗粒投影从 32 个方向进行扫描,记录其粒度和粒形数据,并根据投影将颗粒假设为旋转椭球体,估算颗粒的体积,最终粒度和粒形分布结果以体积百分比的形式呈现。主要参数解释见表 1。

在粒度测量上,与火山学最常用的筛分法相比,动态图像法更快捷便利,不受筛网粒径级限制。而且,当以所有扫描方向中最窄的颗粒宽度($x_{c\min}$)衡量颗粒物粒度分布时,CAMSIZER 所得到的粒度分布情况与筛分法基本一致;以等效球径(x_{area})衡量粒度分布时,与激光衍射法一致(Buckland et al., 2021),这使得不同方法测得的粒度数据之间的比

表 1 CAMSIZER 图像分析主要参数解释

Table 1 Explanation of main parameters of CAMSIZER image analysis

参数	参数解释
$x_{c\ min}$	颗粒宽度;CAMSIZER 对每个颗粒的 32 个方向进行扫描,从 32 个不同方向测量颗粒在该方向上的最大弦长为 x_c (c 为 chord 的简写),取 32 个弦长值中最小的一个作为颗粒弦长 $x_{c\ min}$, $x_{c\ min}$ 常用于与筛分法结果对比
x_{area}	等效球径;为与颗粒投影面积相等的圆形的直径, x_{area} 常用于与激光衍射法结果对比
$x_{Fe\ max}$	颗粒长度;从 32 个不同方向测量颗粒在该方向上的费雷特直径 x_{Fe} (从颗粒平面投影边界的某一方向作一对平行切线,这对切线间的距离被称为费雷特粒径, Fe 为 Feret diameter 的简写)。取 32 个费雷特直径中最大的一个作为颗粒长度 $x_{Fe\ max}$,即颗粒的最大卡规径
$SPHT$	类球度 (Sphericity): $SPHT=4\pi A/P^2$,由颗粒周长 P 和颗粒面积 A 确定,也被称为形状因子 (Liu et al. ,2015),可用来表征颗粒的不规则程度。完美的圆或球体的类球度等于 1,对于所有其他形状,类球度小于 1
b/a	长宽比 (Aspect ratio): $b/a=x_{c\ min}/x_{Fe\ max}$,这是由所有测量中最窄的颗粒宽度 ($x_{c\ min}$) 和所有测量中最长的颗粒长度 ($x_{Fe\ max}$) 决定的
$Conv$	凸度 (Convexity): $Conv=\sqrt{A/A_{conv}}$,由测量的颗粒面积 A 和凸颗粒面积 (即将实际颗粒投影凹入部分补全后的面积) A_{conv} 确定。凸颗粒的凸度等于 1,对于所有其他颗粒,其凸度小于 1

较成为可能。在粒形分析上,火山学常用扫描电镜 (SEM)与图像处理软件相结合的方法,与此相比,动态图像法可在很短的时间内获得颗粒物的批量粒形数据,大大节省实验时间,相较于图像分析软件以测定碎屑颗粒最小外切矩形的长度和宽度、颗粒最佳拟合椭圆的长轴和短轴、颗粒的面积和周长等来确定碎屑物粒形的方式更加接近碎屑物本身特征。

3.2 粒度粒形实验和分析方法

笔者等运用德国 Microtrac MRB CAMSIZER 动态图像粒度分析仪对蛤蟆塘火山空落堆积物等进行粒度和粒形分析。首先,将样品在实验室内烘干,对颗粒粒径进行初步测量,结果发现所有样品粒径均在 25 mm 以内,因此运用 CAMSIZER 对其分析可确保较高的精确性。而后,在 CAMSIZER Microtrac Retsch 软件中设置以 1Φ 值为间隔的径级文件,粒度 d 表征范围设置为 $-4\Phi\sim5\Phi$,来表征本文中 0.03 ~ 25 mm 的颗粒。将样品倒入粒度分析仪进行测量 ($d/\Phi=-\log_2(D/\text{mm})$, D 是以 mm 为单位每个径级下界的碎屑直径),得到以体积百分含量形式呈现的粒度和粒形数据 (例如:粒径为 1~2 mm 的颗粒, D 为 1 mm, d 为 0Φ ;2~4 mm 的颗粒, D 为 2 mm, d 为 -1Φ)。

采用 McManus (1988) 矩法计算粒度参数,其计算公式如下:

平均粒度: $\bar{d}=\sum f d_m$ (1)

分选系数: $\delta=\sqrt{\sum f (d_m-\bar{d})^2}$ (2)

偏态: $Sk=\sqrt[3]{\sum f (d_m-\bar{d})^3}$ (3)

峰态: $K=\sqrt[4]{\sum f (d_m-\bar{d})^4}$ (4)

f 为各粒级出现的频率, d_m 为各粒级的中间粒度值 (例如:粒度 d 为 0Φ 的颗粒体积百分含量为 20%,表示 1~2 mm 的颗粒体积百分含量为 20%,此时 f 为 20%, d_m 为 -0.5Φ ;粒度 d 为 -1Φ 的颗粒体积百分含量为 10%,表示 2~4 mm 的颗粒体积百分含量为 10%,此时 f 为 10%, d_m 为 -1.5Φ)。

上述粒度参数中,分选系数可以用来表示碎屑大小分布的均匀程度。在火山学中,分选系数为 0~1 代表分选好,1~2 代表分选较好,2~3 代表分选差,3~4 代表分选很差 (Cas et al. , 1987)。偏度 Sk 代表颗粒粒度分布的不对称程度,其中,正偏态为偏向粗粒一侧,表示碎屑以粗粒为主,负偏态偏向细粒一侧,表示碎屑以细粒为主。峰态可用来度量碎屑物频率曲线的尖锐度,也就是度量粒度分布的中部与两尾端的展形之比,反映了颗粒粒度的相对集中程度。贾建军等 (2002) 提出了适用于 McManus 矩法粒度参数分级表,表中对峰态的定性描述为:峰态 <0.72 为非常窄;0.72~1.03 为很窄;1.03~1.42 为中等;1.42~2.57 为宽;2.57~4.50 为很宽; >4.50 为非常宽。

从 CAMSIZER 测得的粒形参数中,选择火山学中常用的类球度 ($SPHT$)、长宽比 (b/a) 和凸度 ($Conv$) 来分别衡量蛤蟆塘火山碎屑物的规则程度、拉长情况和表面粗糙度。类球度可表征颗粒的类球程度 (或不规则程度),对颗粒形状的变化敏感,为评估颗粒整体不规则性的最佳单一参数。按照 Coltelli 等 (2008) 的分类,颗粒可分为棱角状 ($SPHT$

<0.6)、次棱角状(0.6<*SPHT*<0.65)、次圆状(0.65<*SPHT*<0.73)、圆状(0.73<*SPHT*<0.77)和极圆状(*SPHT*>0.77)。长宽比体现颗粒的拉长状况,但无法直接表征颗粒形状。根据 Folk (1974) 的分类,颗粒可以分为极拉长状(*b/a*<0.6)、拉长状(0.6<*b/a*<0.63)、次拉长状(0.63<*b/a*<0.66)、中间形状(0.66<*b/a*<0.69)、次等轴状(0.69<*b/a*<0.72)、等轴状(0.72<*b/a*<0.75)和极等轴状(*b/a*>0.75)。凸度量化了颗粒面积的空间分布,因此对颗粒的凹坑最为敏感,可反映颗粒表面的粗糙程度。

3.3 分形维数理论

分形分析已被应用于描述各种各样的天然碎片材料(刘永顺等,2014)。Mandelbrot (1982) 对岛屿群的大小分布进行了研究,并建立了如下方程来量化其分布:

$$N(r>R)=R^{-D} \tag{5}$$

其中 *D* 为分形维数,*N* (*r*>*R*) 为 *r* 大于给定尺寸 *R* 的颗粒总数。对等式两边取对数:

$$\lg [N(r>R)]=-D \lg (R / \text{mm}) \tag{6}$$

天然火山碎屑和模拟实验研究均已证实火山碎屑物中存在分形破碎机制,火山碎屑尺寸分布的分形维数可以用来量化火山喷发期间碎屑物的破碎程度。Tyler 和 Wheatcraft (1992) 以及 Turcotte (1986, 1992) 开发了一种更适合碎屑物的“基于质量”的方法,并被广泛应用。等式(5)可用于从它们的线性尺寸 *R* 导出每个碎片的质量,如果直径 *R* 与筛孔尺寸一致,则通过每个筛孔的颗粒数可以用通过该筛孔的颗粒总质量 *m_T* 除以每个颗粒的密度来计算:

$$m(r<R) / m_T=R^{D_m} \tag{7}$$

其中 *m* (*r*<*R*) 是粒径 *r* 小于筛网尺寸 *R* 的颗粒累积质量,而 *D_m* 是基于质量的分形维数。其中直径为 *R* 的颗粒体积与其质量 *m* 成正比

(*R*³∝*m*),因此颗粒数的增量与颗粒质量的增量遵循(Turcotte, 1992):

$$dm \propto R^3 dN \tag{8}$$

利用上述公式,建立基于质量的分形维数 *D_m* 与 *D* 的关系。

笔者等利用动态图像分析得到的粒度分布为基于体积的粒度数据。颗粒体积与颗粒直径有较强的相关性,因此我们建立:

$$\frac{V(r<R)}{V_T}=R^{D_v} \tag{9}$$

其中 *V* (*r*<*R*) 是粒径 *r* 小于径级上界尺寸 *R* 的颗粒累积体积,而 *D_v* 是基于体积的分形维数。

对(5)和(9)方程求一阶导数可得:

$$dN \propto R^{-D-1} dR \tag{10}$$

$$dV \propto R^{D_v-1} dR \tag{11}$$

其中直径为 *R* 的颗粒的体积与其直径 *R* 成正比(*R*³∝*V*),因此颗粒数的增量与颗粒体积的增量

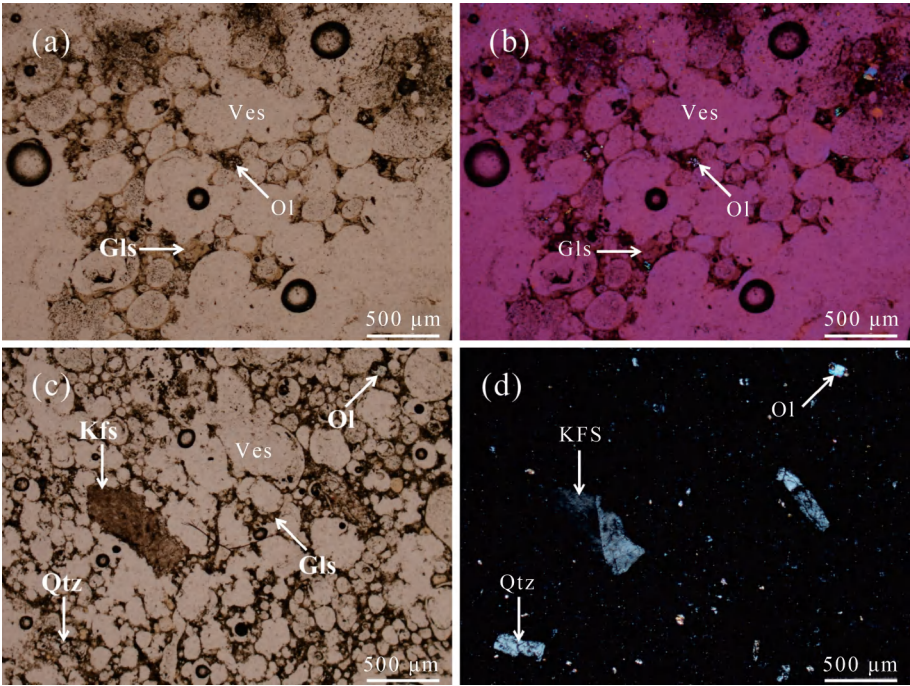


图3 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山空落浮岩的显微岩相照片:(a)剖面下层浮岩中的气孔和橄榄石斑晶(单偏光);(b)同(a)(正交偏光加石膏试板);(c)剖面上层浮岩中的气孔、橄榄石斑晶及石英和钾长石捕虏晶(单偏光);(d)同(c)(正交偏光)

Fig.3 Microphotographs of the pumices in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang: (a) Vesicles and olivine phenocrysts in the lower fallout scoria of the section (plane polarized light); (b) the same as (a) (cross polarized light with gypsum plate); (c) vesicles, olivine phenocrysts, and the xenocrysts of quartz and K-feldspar in the upper fallout scoria of the section (plane polarized light); (d) the same as (c) (cross polarized light)

缩写:Ol—橄榄石;Qtz—石英;Kfs—钾长石;Gls—火山玻璃;Ves—气孔

Abbreviations:Ol—olivine; Qtz—quartz; Kfs—K-feldspar; GlS—volcanic glass; Ves—vesicle

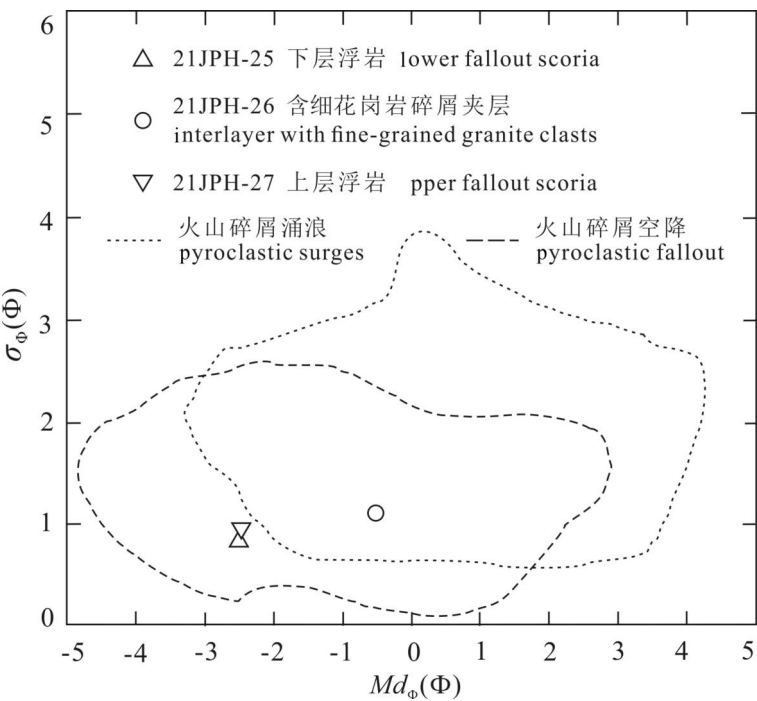


图 4 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物成因类型
判别图(改自 Walker,1983)

Fig.4 Identification map of genetic types of pyroclastic deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang (modified from Walker, 1983)

表 2 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物粒度参数

Table 2 Grain-size parameters of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

样品号	d_{16}	d_{50}	d_{84}	σ_{Φ}	$\bar{d}$	δ	Sk	K
21JPH-25	-3.370	-2.520	-1.721	0.825	-2.404	1.232	1.567	2.209
21JPH-26	-1.900	-0.512	0.375	1.137	-0.633	1.140	0.637	1.575
21JPH-27	-3.243	-2.506	-1.312	0.965	-2.192	1.338	1.698	2.282

遵循:

$$dV \propto R^3 dN \tag{12}$$

将 (10) 和 (11) 带入 (12) 得到

$$R^{D_v-1} \propto R^3 R^{-D-1} \tag{13}$$

即

$$D = 3 - D_v \tag{14}$$

D_v 是通过计算 $\frac{\lg [V (r < R) / \text{mm}^3]}{\lg (r / \text{mm})}$ 线性拟合的斜率得到的。

4 空落堆积物岩相学特征

本文将蛤蟆塘火山空落浮岩在北京大学岩石磨片室制成薄片,采用 Nikon Eclipse LV100 POL 偏光显微镜和 NIS-Elements D 软件对磨制好的薄片进行

观察和岩相显微照片拍摄(图 3)。下层浮岩的斑晶和捕虏晶极少,火山玻璃和气孔较多,薄片在正交偏光下消光强烈,因此加入石膏试板进行观察(图 3b),石膏试板在正交偏光下呈现一级紫红干涉色,可使薄片干涉色升高一个级序,便于观察和识别。

蛤蟆塘黑色火山浮岩为玻基响岩质碱玄岩,斑状结构,气孔构造。气孔形态多为圆形和卵形,少数气孔变形呈拉长状。气孔化程度较高,气孔大小分布不均,上层浮岩小气孔比例较高,气孔密度大。基质为黄褐色火山玻璃。斑晶矿物很少,主要为橄榄石,半自形至他形粒状结构,无色透明,正高突起,不规则裂理发育,三级干涉色。岩浆在喷出地表过程中捕获有花岗岩等壳源碎屑,岩石中可见石英和钾长石捕虏晶。石英呈粒状,正低突起,干涉色一级灰到黄白,边缘熔蚀,内部有裂纹。钾长石呈板状,表面浑浊,干涉色一级灰至灰白,常见卡斯巴双晶,边缘熔蚀。

5 火山碎屑堆积物粒度和粒形分析

5.1 粒度分析

本文根据 CAMSIZER 测得的粒度数据,判别蛤蟆塘火山碎屑物成因(图 4),建立粒度分布直方图(图 5)和粒度分布累计曲线(图 6),并采用 McManus (1988) 矩法计算粒度参数,对粒度分布特征作出定量和定性描述。分析数据详见表 2。

假定样品的密度在测量范围内均一,利用 Walker(1971, 1983)建立的火山碎屑堆积物成因类型判别图对蛤蟆塘碎屑物样品进行了分析。Walker 采用 Inman(1952)提出的颗粒物中值和分选系数方法来判别火山碎屑的成因类型,不同于 McManus 矩法粒度参数中的平均粒度 $\bar{d}$ 和分选系数 δ 的计算方法,在 Inman 参数中,中值粒度 $Md_{\Phi} = d_{50}$,它反映了样品粒度分布的集中趋势,累积百分含量达到 50%时的中值粒度 Φ 值记作 d_{50} ,分选系数 $\sigma_{\Phi} = \frac{d_{84} - d_{16}}{2}$,样品体积累积百分含量达到 16% 和 84% 时的粒度 Φ 值分别记作 d_{16} 和 d_{84} 。成因类型判别图如图 4 所示,计算结果见表 2,判别结果与野外观

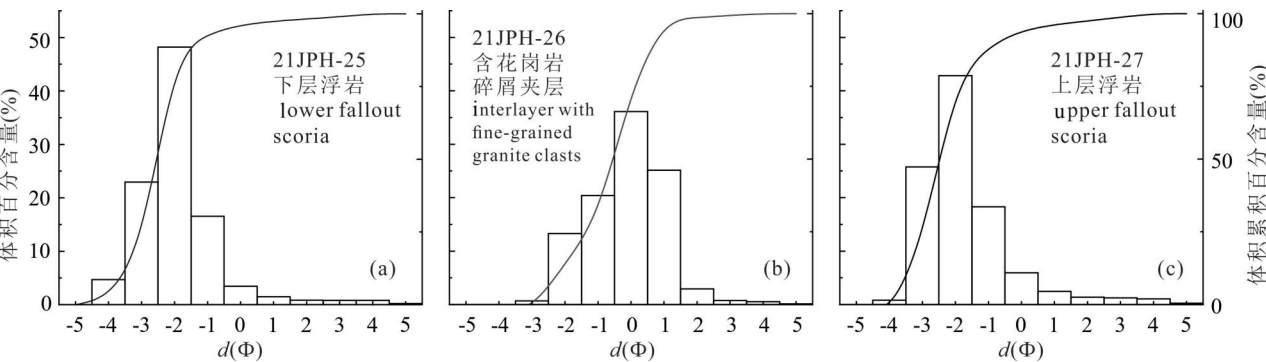


图 5 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物粒度频率分布直方图和粒度累积频率曲线图

Fig. 5 Grain-size distribution and cumulative frequency curve of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

察和前人研究结果一致。上下层浮岩均落在火山碎屑空降范围内,为岩浆喷发形成的空落浮岩;含细花岗岩碎屑夹层的碎屑物落在火山碎屑涌浪与火山碎屑空落分布区的交集内,但投点位置与上下层空落浮岩区别明显。夹层内大量的基底花岗岩碎屑的存在证明了喷发过程中水的参与,因此判定其为射气岩浆喷发形成的火山碎屑涌浪堆积。

蛤蟆塘火山碎屑物粒度分布直方图如图 5 所示,粒度主要分布范围为 $-4\Phi\sim4\Phi$ (颗粒大小主要为 $1/16\sim25\text{ mm}$),浮岩样品粒度峰值在 -2Φ ($4\sim8\text{ mm}$)处,含细花岗岩碎屑夹层粒度峰值在 0Φ ($1\sim2\text{ mm}$)处,均为单峰式分布,表明各层堆积物的成因可能较为单一。粒度的大小与火山爆炸程度有关,爆炸程度越高,粒度 Φ 值越大。空落浮岩样品 21JPH-25 和 21JPH-27 粒度分布特征相似,大部分颗粒粒度都小于或等于 1Φ (颗粒粒径大于 0.5 mm),中值粒度分别为 -2.520Φ 和 -2.506Φ ,平均粒度分别为 -2.404Φ 和 -2.192Φ 。含细花岗岩碎屑夹层的大部分颗粒粒度分布范围为 $-2\Phi\sim2\Phi$ ($0.25\sim8\text{ mm}$),中值粒度和平均粒度为 -0.512Φ 和 -0.633Φ ,粒度 Φ 值明显偏大,表明形成该层碎屑时火山爆炸程度更高,这符合射气岩浆喷发特征,即喷发时水的加入导致岩浆和围岩的破碎化程度高于岩浆喷发。分选的好坏与火山喷发方式和碎屑物的组成有关,分选值越小,分选越好,但不同计算方法得到的分选值可能有所不同。根据 Inman 参数,浮岩样品分选为 0.825 和 0.965,分选好,含细花岗岩碎屑夹层的分选值较大,为 1.137,分选较好。这主要是由于浮岩碎屑物是由岩浆喷发形成的,组成成分单一,而含细花岗岩碎屑夹层是由射气岩浆喷发形成的,水的加入导致围岩破碎,增加了该层碎屑物种类,导致分选变差。然而,采用 McManus(1988)矩法计算得到的结果显示,含细花岗岩碎屑夹层的分选系数为 1.140,与 Inman 参数相近,但下层和上层浮岩的分选系数分别为 1.232 和 1.338,比 Inman 参数计算结果大得多。这是因为,Inman 参数反映的是碎屑物样品累计体积在 16% 到 84% 内的子区间样品的分

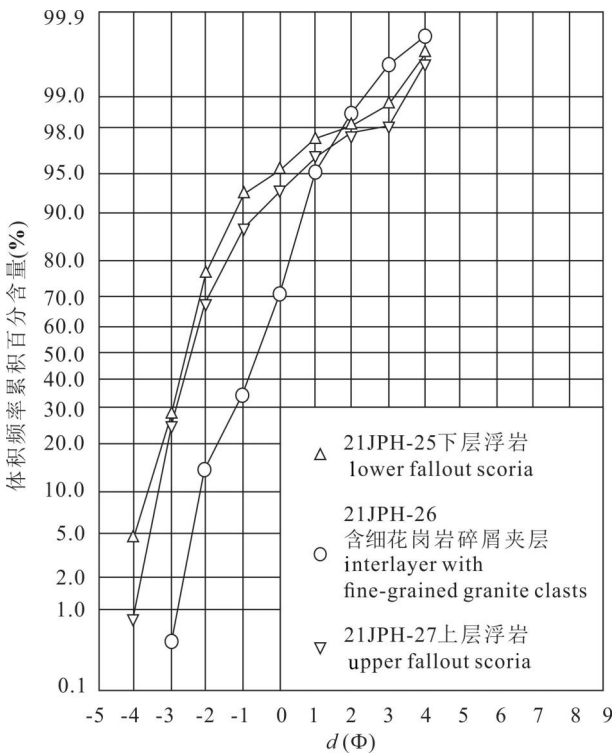


图 6 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物累积曲线图

Fig. 6 Accumulation curve of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

选特征,是样品的主体特征,而矩法反映的是样品总体特征(贾建军等,2002)。浮岩样品总体分选值的升高,主要是由于其直方图尾部粒度为 $-1.721\Phi \sim 4\Phi (-1.312\Phi \sim 4\Phi)$ 的颗粒没有被 Inman 参数计算到的缘故,这部分细颗粒降低了浮岩碎屑的分选性。偏态越正,粒度分布越偏向粗粒。样品偏态分别为 1.567、0.637 和 1.698,偏度为正,说明相对于平均粒度,所有样品粒度分布均偏向粗颗粒,浮岩层比含细花岗岩碎屑夹层更偏向粗颗粒一侧,与上述粒度分布特征相符。峰态越小,粒度分布越集中。样品峰态分别为 2.209、1.575 和 2.282,峰态定性描述为宽,浮岩峰态较小,表明其粒度频率曲线更尖锐,粒度分布相对集中,集中在粗颗粒一侧。

粒度概率累计曲线可在粒度分布直方图的基础上,进一步研究粒度分布的变化情况以及碎屑物的搬运过程。根据粒度数据,绘制了蛤蟆塘火山碎屑物的粒度概率累积曲线图(图 6)。所有样品的累计频率曲线均呈较为相近的右侧抬升趋势,空落浮石样品之间相似性更为明显,表明碎屑物在空中搬运和沉降时都受到了相似的重力分选作用。样品粒度分布范围窄,斜率大,这是火山碎屑物受风力分选作用的结果。21JPH-25 和 21JPH-27 以粗颗粒为主,累计曲线靠左;21JPH-26 细颗粒更多,曲线总体靠右。在 $-1\Phi \sim 3\Phi (1/8 \sim 4\text{ mm})$ 的粒度范围内,含细花岗岩碎屑夹层的累积曲线斜率明显大于空落浮岩,表明细粒含量增加的斜率变大,向细粒端元集中,表明火山爆炸强度更大。

5.2 分形维数统计

蛤蟆塘火山碎屑物双对数粒度分布图显示这些碎屑物并非为单一幂律分布特征(图 7 a—c)。因此,我们使用多段幂律分布来拟合蛤蟆塘火山碎屑物。在每段不同的幂律分布中,都存在粒度频率分布曲线峰值与其对应(图 7 d—e)。确定多段幂律分布分界点的方法为:将图像中观察到的可能拐点作为不同幂律分布的分界点进行计算,对该点左右两端的点进行分段拟合,若线性拟合产生的相关系数 R^2 大于 0.9、标准偏差 S 小于 0.1,则认为其为有效拐点,取所有有效拐点中能使其两侧点均具有更好线性拟合的点,作为最终不同幂律分布的分界点。

以四段幂律分布拟合空落浮岩(图 7 a、b),上下层浮岩的幂律分布随粒径变

化大体相似,分形维数拐点 1 在 1/8 mm 处,JPH-A 颗粒的分形维数很小,为 0.962 和 0.185,JPH-B 的分形维数大于 JPH-A,分别为 2.321 和 2.363;拐点 2 在 2 mm 处和 $\sqrt{2}$ mm 处,JPH-C 分形维数分别为 1.295 和 1.724;拐点 3 在 8 mm 处,JPH-D 的分形维数 2.706 和 2.334。

含细花岗岩碎屑夹层为岩屑和浮岩的混合物,两者由不同破碎机制控制(图 7 c)。以 2 mm 为拐点,JPH-E 分形维数 1.073,JPH-F 分形维数为 2.7,较小颗粒的分形维数小于较大颗粒。以 10 目、孔径为 2 mm 的标准筛对其进行筛分发现,小于 2 mm 颗粒中花岗岩岩屑和小颗粒玄武质浮岩混合存在,花岗岩岩屑约占 60%左右,其分形维数代表着两者混合后特征,而大于 2 mm 颗粒中,花岗岩岩屑含量约占 10%,其分形维数更倾向于代表该层中小颗粒浮岩的分形特征。

5.3 粒形分析

本文通过 CAMSIZER 对蛤蟆塘火山碎屑物的粒形特征(类球度、长宽比、凸度)进行了定量分析,对其粒形分布特征和粒形随颗粒大小变化规律两方面进行了研究,粒形越接近于 1,颗粒越规则。由于空落浮岩样品粒径 16~25 mm 的颗粒虽占有一定的体积分数,但其颗粒数不到样品颗粒总数的 0.03%,为排除过少颗粒数造成的偶然性,本文只针对粒度为 $-3\Phi \sim 5\Phi$ (粒径小于 16 mm)的颗粒进行了粒形随颗粒大小变化情况的分析。

火山碎屑物形状反映了火山喷发过程中的破碎机制,主要受到岩浆性质和火山喷发方式的控制。蛤蟆塘火山碎屑物的粒形分布情况如图 8 及表 3 所

表 3 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物各径级平均粒形值
Table 3 Average grain shape value of each diameter class of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

粒度 (Φ)	SPHT			b/a			Conv		
	21JPH -25	21JPH -26	21JPH -27	21JPH -25	21JPH -26	21JPH -27	21JPH -25	21JPH -26	21JPH -27
-3	0.670	0.634	0.688	0.725	0.758	0.731	0.962	0.95	0.965
-2	0.697	0.699	0.693	0.703	0.695	0.698	0.965	0.961	0.964
-1	0.69	0.753	0.703	0.665	0.704	0.673	0.964	0.974	0.966
0	0.712	0.811	0.714	0.672	0.749	0.676	0.970	0.987	0.971
1	0.664	0.809	0.658	0.649	0.731	0.651	0.957	0.986	0.955
2	0.651	0.790	0.650	0.638	0.695	0.645	0.953	0.984	0.950
3	0.696	0.747	0.691	0.671	0.699	0.670	0.970	0.981	0.966
4	0.738	0.746	0.741	0.738	0.734	0.732	0.987	0.989	0.987
5	0.755	0.755	0.761	0.795	0.801	0.799	0.995	0.994	0.996
平均值	0.685	0.773	0.691	0.691	0.708	0.687	0.964	0.98	0.964

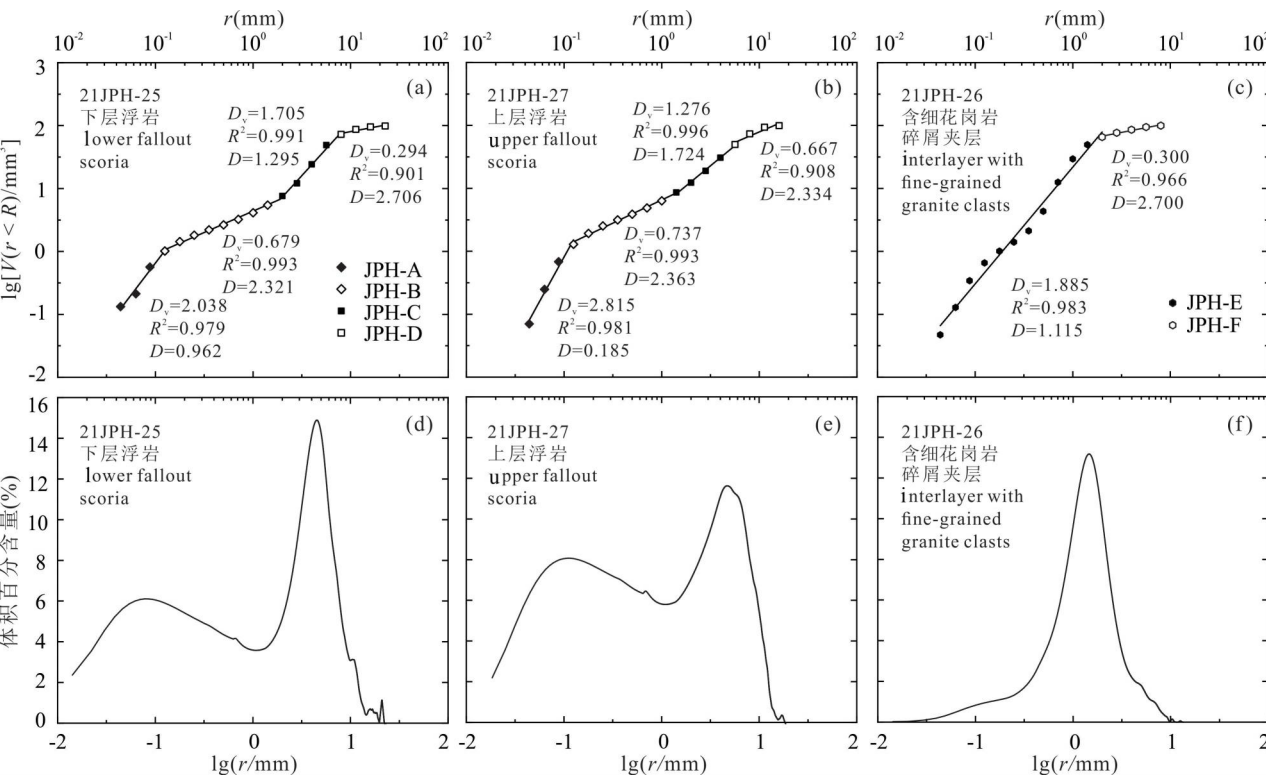


图 7 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物粒度分布及其分形维数

Fig. 7 Grain-size distribution and fractal dimension of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

示。总体来看,粒形分布图均为单峰,峰值偏右,累计曲线均呈现先凹后凸的特征,证明颗粒先快速向规则的形态特征趋近,后变化趋于平缓,也就是说大部分颗粒的形态都较为规则。岩浆的性质对颗粒形态有很大影响,相较于其他岩类(如安山岩和流纹岩),玄武质火山碎屑物颗粒更规则,极端形状颗粒较少(Andronico et al., 2014),蛤蟆塘火山碎屑物的粒形特征与玄武质火山碎屑物的特征相符。具体来看,浮岩样品和含细花岗岩碎屑夹层样品的类球度(*SPHT*)差异明显。浮岩类球度分布范围为 0 到 1,分布范围很广,但不规则颗粒占少数,绝大部分分布在 0.6 到 0.8 之间,平均类球度为 0.685 和 0.691。约 20% 的样品呈棱角状,约 45% 的样品为次棱角状和次圆状,其余为圆状和极圆状。含细花岗岩碎屑夹层颗粒的类球度分布范围为 0.2 到 1,粒形分布峰值在 0.8 到 0.9,累计曲线比浮岩偏右,更加快速地向规则形态趋近,平均类球度为 0.773,绝大多数颗粒为圆状和极圆状,比浮岩更为规则。这与火山喷发方式有关。陈洪洲等(2005)通过野外实地观察得出,蛤蟆塘空落浮岩堆积物多为尖棱角炉渣状,而射气岩浆喷发形成的花岗岩碎屑有很好的圆度,

多呈半圆状,少数为圆状,个别呈次棱角状,夹层中的玄武质浮岩也多为火山豆、火山砾,此现象与本文类球度量化结果一致。与类球度不同,蛤蟆塘火山碎屑物长宽比(*b/a*)和凸度(*Conv*)分布差异较小,含细花岗岩碎屑夹层颗粒的粒形值略高于空落浮岩的值。长宽比分布范围均为 0.3 到 1,有 30% 左右的颗粒为极拉长状、拉长状和次拉长状,20% 为中间形状和次等轴状,其余为等轴状和极等轴状。火山碎屑的拉长状况与岩性有关,前人研究表明玄武质火山碎屑长宽比约为 0.7(Riley et al., 2003; Coltelli et al., 2008),本文空落浮岩长宽比平均值为 0.691 和 0.687,与前人研究类似。凸度绝大部分分布在 0.9~1,表明颗粒表面粗糙度不高。凸度受到破碎前熔体中气泡的尺寸和空间分布控制,气泡与颗粒外表面的交叉会使颗粒表面产生凹面,增加其粗糙度。一般来说,射气岩浆喷发产生的浮岩表面更粗糙(Liu et al., 2015),但含细花岗岩碎屑夹层中含有大量表面光滑、不含气泡的致密岩屑,由于本文未对气泡进行详细的量化研究,无法精确确定夹层中浮岩的凸度以及气泡对颗粒表面粗糙度的影响。

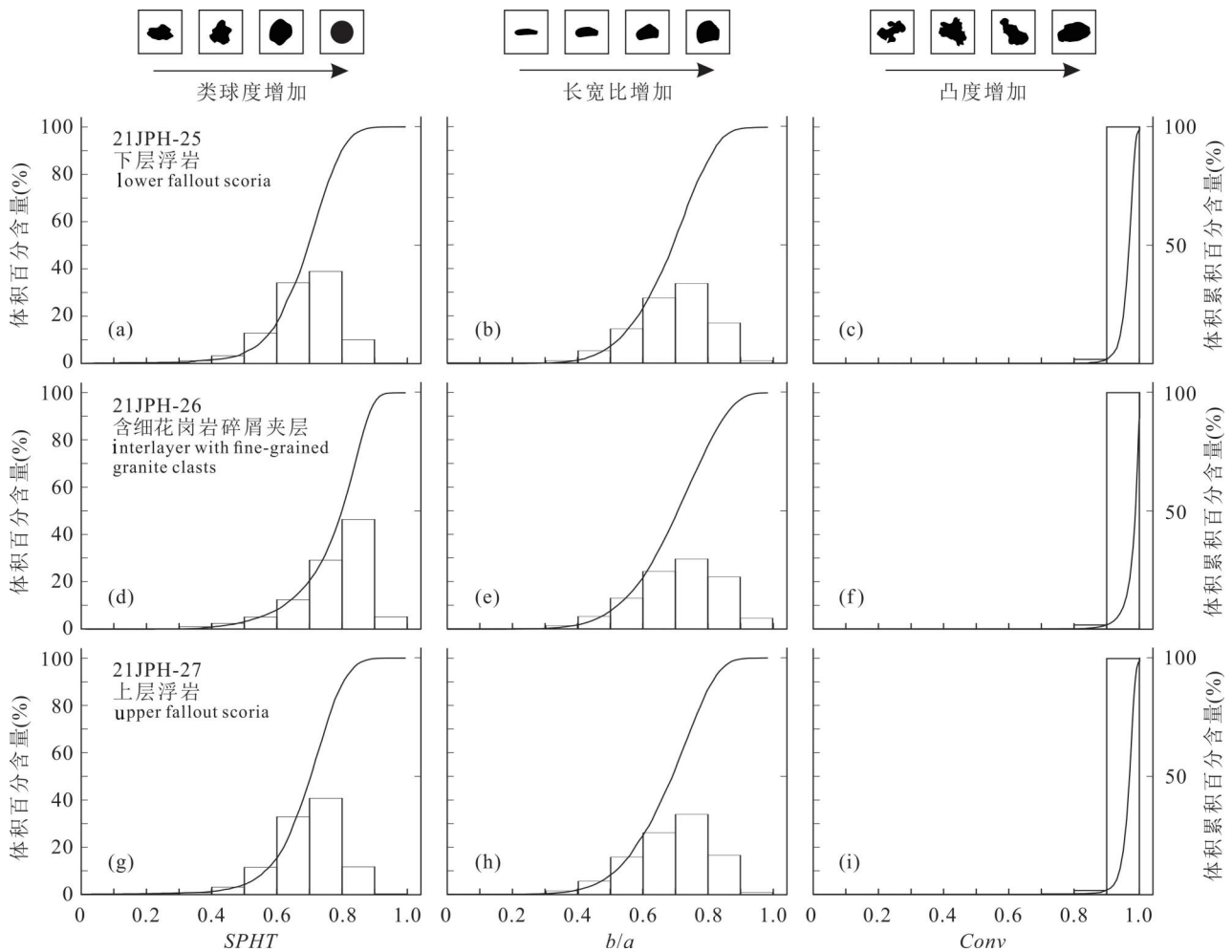


图 8 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物粒形分布图

Fig. 8 The distribution map of grain shape of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

除了火山喷发方式和岩浆性质,火山碎屑物的形状还与颗粒大小有关,而这种颗粒的粒形与颗粒大小的相关性,本质上受到气泡大小控制。Mele 和 Dioguardi (2018) 研究发现,随着颗粒尺寸接近气泡尺寸,颗粒球形度(表征颗粒不规则程度的三维指标)减小,不规则性增加。通常情况下,气泡大小的模拟值为 0.1~1 mm (Rust and Cashman, 2011),因此 Saxby 等 (2020) 认为,此粒径下的颗粒最不规则,并在冰岛火山灰粒形实验中发现,粒径约为 1/8~1 mm 的颗粒具有最低的球形度,从而证实了这一观点。蛤蟆塘火山空落浮岩粒形随颗粒大小变化规律与前人研究类似(图 9 a—c;表 4),粒度为 0Φ~5Φ(小于 2 mm)的火山灰随着颗粒大小趋近于 1/8~1 mm,类球度、长宽比和凸度均变小,在 2Φ(0.25~0.5 mm)处,各项粒形值最小,粒形最不规则。然而,粒度为-3Φ~0Φ(2~16 mm)的浮岩颗粒类球度

却随着颗粒变大而明显减小,可能由于浮岩颗粒在地表未受明显的搬运磨圆作用,而保留了较多的棱角。对本文含细花岗岩碎屑夹层而言,大量致密岩屑的存在使其粒形变化规律与浮岩不同(图 9 d—f;表 4)。粒度为-3Φ~0Φ(2~16 mm)时颗粒的粒形参数大体随粒度的增加而增加,最小值存在于大颗粒中;而粒度为 0Φ~5Φ(小于 2 mm)时粒形随粒度的增加先减小后增加,最小值出现在 2Φ~4Φ(1/16~0.5 mm)之间。

6 蛤蟆塘火山碎屑堆积物形成机制

火山碎屑物的粒度分布是分形的,分形维数 D 是不同大小碎片相对丰度的量度, D 值越高,表明破碎效率越高,碎片丰度越大 (Kueppers et al., 2006; 刘永顺等, 2014; Paredes-Mariño et al., 2017)。如果火山碎屑物的粒度分布显示出多种幂律分布,往

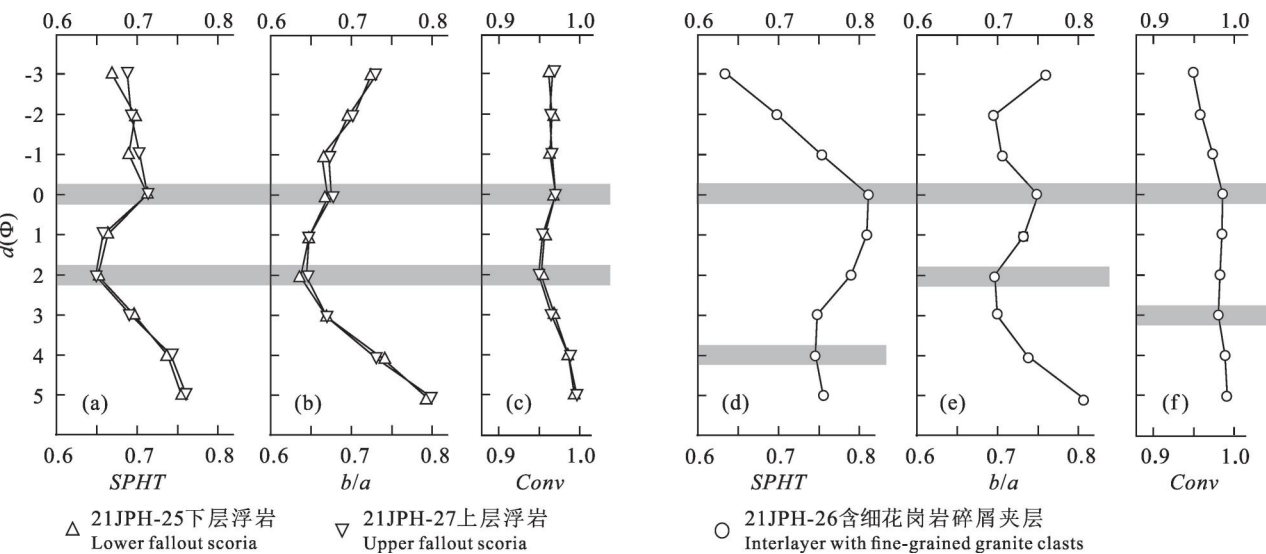


图9 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物粒形随粒度变化曲线

Fig. 9 Variation curve of grain shape versus grain-size of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

往表明火山碎屑物受到多个形成机制的控制 (Turcotte, 1992; Jones and Russell, 2017; Paredes-Mariño et al., 2017, 2019)。在接下来的讨论中,我们试图将蛤蟆塘火山碎屑物粒度分布中存在着多段幂律分布的现象与火山喷发的复杂过程联系起来,并讨论每段幂律分布下的颗粒形成的主导机制。

6.1 浮岩形成机制

当接近玻璃化转变时所产生的应力克服岩浆拉伸强度时,即当气泡内壁的扩张应力超过岩浆的抗拉强度时,含气泡的岩浆就会破碎。关于含气泡岩浆破碎机制目前已经提出了多种方案,如气泡临界堆积破碎 (Sparks, 1978)、气泡超压破碎 (Zhang Youxue, 1999)、应变诱导破碎 (Papale, 1999)。除了这些初始破碎及其所形成的粒度分布外,空落火山碎屑降落至地面之前还会经历复杂的作用过程,

因此不能把样品所表现出的粒度特征全部归因于由气泡生长导致的岩浆破碎。一方面,应考虑到碰撞对颗粒的作用,这种作用包括高能碰撞和低能碰撞,高能碰撞在相对封闭的火山通道内普遍发生,甚至可以持续到喷发柱中,碰撞使颗粒发生二次连续破碎,生成粒径更小的颗粒以及大量的火山灰,从而改变碎屑物的初始粒度分布和分形维数 (Dufek et al., 2012; Jones et al., 2016; Jones and Russell, 2017; Jones et al., 2019)。低能碰撞往往发生在火山碎屑离开火山口附近后,尤其是火山碎屑流中。颗粒间的低能碰撞使得颗粒磨圆,由磨圆作用产生的火山灰对分形维数的改变很小 (Dufek et al., 2012)。另一方面,应考虑风力对火山灰的作用,火山灰易受风力搬运,在局部地区发生富集或亏损 (Turcotte, 1992; Perugini et al., 2011),进而改变其分形维数。

综合上述因素,对蛤蟆塘火山空落浮岩进行了分析。两个浮岩样品的粒度分布均存在四种幂律分布,三个拐点依次为 1/8 mm、 $\sqrt{2} \sim 2$ mm 和 8 mm,分形维数值由大到小为 JPH-D>JPH-B>JPH-C>JPH-A (图 7a、b)。Dufek 等 (2012) 认为只有当岩浆破碎深度较浅时,颗粒才有避免高能撞击引发的二次破碎的可能,但浅层岩浆破碎往往形成火山碎屑流,深层破碎才有助于形成较高的喷发柱。蛤蟆塘浮岩由空落堆积产生,因此

表 4 黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑堆积物粒形分布 (单位: %)

Table 4 Grain shape distribution of the pyroclast deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang (unit: %)

粒形	SPHT			b/a			Conv		
	21JPH	21JPH	21JPH	21JPH	21JPH	21JPH	21JPH	21JPH	21JPH
	-25	-26	-27	-25	-26	-27	-25	-26	-27
<0.6	17.5	8.3	15.3	21	19.9	22.9	—	—	—
0.7	33.8	12.1	32.5	27.4	24.2	26.0	—	—	—
0.8	38.5	28.8	40.1	33.6	29.5	33.7	—	—	0.2
0.9	10.0	45.7	11.5	16.9	21.9	16.5	1.7	1.7	1.7
1	0.2	5.1	0.3	1.1	4.5	0.9	98.3	98.3	98.1

我们推测 JPH-B ($1/8 \sim 2$ mm) 分形维数较高,是由于该部分主要由高能二次破碎产生的大量火山灰颗粒组成。但有时 D 的高值不能归因于单个碎裂事件,多个碎裂事件的作用有助于增加 D 值 (Kaminski and Jaupart, 1998)。风力对火山灰的影响很大,风力作用下粒径为 $1/8 \sim 2$ mm ($1/8 \sim \sqrt{2}$ mm) 的火山灰在采样点处富集,也会导致 JPH-B 分形维数变大。而同为火山灰颗粒的 JPH-A ($< 1/8$ mm) 分形维数远小于 JPH-B 的原因,可能是极细的颗粒在风力主导作用下飘向了距离火山口更远的位置,在采样点处亏损。与火山灰颗粒不同,较大的颗粒保留着部分初始粒度特征,相对更能代表岩浆的初始破碎强度 (Paredes-Mariño et al., 2017),但我们发现大于 2 mm 的浮岩颗粒中存在着两种幂律分布,证明该部分颗粒的形成仍包含其他因素。Jones 和 Russell (2017) 以初始粒径为 $0.25 \sim 0.5$ mm 的浮岩颗粒为研究对象,进行连续破碎实验发现,随着实验时间的延长,颗粒的中值粒径不断减小,甚至最后会远小于 0.25 mm,这就意味着初始破碎产生的碎屑很大程度上都被转化为了更小的颗粒。JPH-C 的粒径大小与前述实验类似,其分形维数偏小,可能与该粒径下颗粒连续破碎致使其被转化为更小的颗粒有关。21 JPH-D (> 8 mm) 的分形维数偏大,该部分颗粒可能由更大的浮岩和火山弹在浅层二次破碎产生,破碎产物及时离开火山通道,同时也不能排除该部分较大颗粒采样不足导致分形维数值偏大的可能。此外,从图 9 可以看出,较大颗粒的类球度随颗粒粒径的增加而减小,对样品的观察发现较大颗粒具有较多的棱角,因此本文对火山碎屑因地表搬运作用对其分形维数的影响暂不讨论。

6.2 含细花岗岩碎屑夹层

与岩浆喷发相比,射气岩浆喷发破碎效率更高,产生的碎屑物颗粒粒径更小 (Walker, 1973; Németh and Cronin, 2011; Németh et al., 2012; Van Otterloo et al., 2013; Gjerløw et al., 2015; Liu et al., 2015)。含细粒花岗岩碎屑夹层是射气岩浆喷发的产物。岩浆在上升过程中遇到地下水或地表水,水快速蒸发、膨胀导致蒸汽爆炸 (Liu et al., 2017)。爆炸产生的能量带动围岩破碎,形成由浮岩和细粒花岗岩岩屑混合而成的碎屑夹层。混合成分中的浮岩有着与前文阐述的类似的浮岩形成机制 (Paredes-Mariño et al., 2017),岩屑的存在增加了浮岩发生高能碰撞和二次破碎的概率,促进其快速向着颗粒变小的方向发展 (Buckland et al., 2018;

Paredes-Mariño et al., 2019)。岩屑形成机制与浮岩不同, Paredes-Mariño 等 (2017) 用 Carpinteri 和 Pugno (2002) 提出的固体破碎模型来解释岩屑中存在着两种破碎机制:①“切割”,在较大的尺度(如岩浆通道中围岩的破碎)上作用,形成较大的颗粒,能量耗散主要发生在体积上,分形维数趋于 3;②“研磨”,在较小的尺度(如岩屑撞击围岩导致其破碎)上作用,形成较小的颗粒,能量耗散主要发生在表面积上,分形维数趋于 2。

由于含细花岗岩碎屑夹层中含有两种破碎机制不同的颗粒,其分形维数只能用来衡量该层的总体破碎程度,而不能将分形维数与两种破碎机制直接对应起来。以 2 mm 为拐点,该层中存在着两种幂律分布,较小颗粒 JPH-E 分形维数小于较大颗粒 JPH-F (图 7c), JPH-E 和 JPH-F 岩屑含量分别为 60% 和 10%,拐点两侧混合物组成比例的差距可能是其分形维数差异的关键因素。将该层的分形维数与浮岩比较发现,同为小于 2 mm 的颗粒, JPH-E 的分形维数比 JPH-B 小很多,没有出现风力作用下颗粒在采样点处富集的现象。这是因为粒形特征对颗粒最终沉降速率的影响很大 (于红梅等, 2011; Saxby et al., 2020)。由图 9 可知,同粒径下该层中的颗粒大多比上下层浮岩颗粒规则,这样的颗粒沉降速率更大,不易被风力远距离搬运。除了粒形的影响,花岗岩岩屑密度远大于浮岩,风力对密度大的岩屑搬运作用略小,使其在距离火山口更近的地方聚集,产生细花岗岩岩屑颗粒富集程度更高、厚度更大的堆积层 (张招崇等, 2001; 陈洪洲等, 2005)。

7 结论

黑龙江镜泊湖地区蛤蟆塘火山碎屑物中的空落浮岩层和含细花岗岩碎屑夹层有着不同的粒度粒形特征和分形维数特征,是由不同的形成机制控制的。

(1) 蛤蟆塘火山空落堆积物粒度分布均为单峰式,粒度 Φ 值 [$d/\Phi = -\log_2 (D/\text{mm})$] 主要分布范围均为 $-4\Phi \sim 4\Phi$ ($25 \sim 1/16$ mm),浮岩样品粒度峰值均在 -2Φ ($4 \sim 8$ mm) 处出现,含细花岗岩碎屑夹层的粒度峰值出现在 0Φ ($1 \sim 2$ mm) 处,粒度 Φ 值偏大,即颗粒偏小,表明形成该层碎屑时,火山爆炸程度更高。

(2) 含细花岗岩碎屑夹层的类球度、长宽比和凸度总体上都大于空落浮岩颗粒,意味其颗粒粒形更为规则、更趋向于球形和等轴。类球度和长宽比随粒径的变化明显,而凸度随粒径的变化幅度很小。

对空落浮岩颗粒而言,粒径为 0.25 ~0.5 mm 的颗粒,其粒形最不规则。

(3)利用多段幂律分布拟合了蛤蟆塘火山空落堆积物。结果表明,空落浮岩中存在四段幂律分布区,拐点分别为 1/8 mm、 $\sqrt{2}$ mm~2 mm 和 8 mm,且 JPH-A 和 JPH-C 颗粒的分形维数小于 JPH-B 和 JPH-D 的分形维数。不同的分形维数是在岩浆初始破碎、火山通道中的二次破碎以及风力分选作用三种机制的控制下形成的。含细花岗岩碎屑夹层以 2 mm 为拐点,存在两种分形维数值,较小颗粒(21JPH-E)的分形维数小于较大颗粒的(21JPH-F),其中的浮岩与花岗岩岩屑的形成受不同的破碎机制控制。浮岩受火山通道内的二次破碎机制作用,而花岗岩碎屑的存在使浮岩以更高的效率发生二次破碎,使其快速向着颗粒粒径减小的方向发展。花岗岩岩屑的破碎存在“切割”和“研磨”两种机制。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

白志达,徐德斌,张秉良,张焘,卜景. 2006. 龙岗火山群第四纪爆破式火山作用类型与期次研究. 岩石学报, 22(6): 1473 ~ 1480.

陈洪洲,马宝君,高峰. 2005. 镜泊湖全新世火山喷发特征. 中国地震, 21(3): 360~368.

陈建文,王德发,张晓东,李长山. 2000. 松辽盆地徐家围子断陷营城组火山岩相和火山机构分析. 地学前缘, 7(4): 371~379.

樊祺诚,孙谦,李霓,尹金辉,陈洪洲,高峰,张锡杰. 2003. 镜泊湖全新世火山空降碎屑剖面 and 喷发历史. 地震地质, 25(1): 3 ~ 11.

贾建军,高抒,薛允传. 2002. 图解法与矩法沉积物粒度参数的对比. 海洋与湖沼, 33(6): 577~582.

刘强,魏海泉,许建东,栗鹏,孙春强,潘波,赵波,于红梅. 2009. 吉林龙岗四海火山碎屑物粒度分析与地质意义. 地震地质, 31(1): 112~121.

刘祥,郎建军. 2011. 五大连池老黑山、火烧山火山岩屑崩落堆积的发现及其喷发历史和模式的重塑. 地质论评, 57(5): 650 ~ 658.

刘祥,隋维国,向天元. 1999. 中国东北地区 4 个活火山群的火山灾害. 地质论评, 45(S1): 196~203.

刘祥. 1996. 当代火山喷发碎屑堆积物的研究进展及其主要类型. 世界地质, 15(1): 1~6.

刘永顺,冯肖兵,聂保锋,彭年,孙善平. 2014. 北京沿河城地区东岭台组酸性火山碎屑流的碎屑分形特征及其成因. 岩石学报, 30(12): 3671~3680.

王有鹏,李德文,王锦鹏. 2019. 金沙江巧家段冲积物动态图像法粒度特征研究. 地质论评, 65(2): 503~513.

王禹钦,于红梅,许建东,陈正全,赵波. 2019. 长白山天池火山千年大喷发 2 期空降浮岩对比. 地震地质, 41(1): 208~224.

于红梅,吴建平,许建东,林传勇,史兰斌,陈孝德. 2012. 长白山天池火山全新世浮岩显微结构特征及其火山学意义. 吉林大学学报(地球科学版), 42(S3): 132~144.

于红梅,许建东,林传勇,赵波. 2008. 吉林省龙岗火山群南龙湾第四纪火山碎屑颗粒特征研究. 岩石学报, 24(11): 2621~2630.

于红梅,许建东,林传勇. 2011. 长白山天池火山千年大喷发空降浮岩碎屑的形貌特征和最终沉降速度. 地震地质, 33(2): 440 ~ 451.

于红梅. 2013. 长白山天池火山全新世浮岩结构及火山碎屑空降灾害研究. 导师: 吴建平. 北京: 中国地震局地球物理研究所博士后研究报告: 1~69.

张秉良,白志达,洪汉净,徐德斌,盘晓东. 2005. 吉林龙岗火山碎屑分形研究. 地震地质, 27(3): 462~469.

张招崇,李兆鼎,李树才,辛影,李兆木,王先政. 1999. 黑龙江镜泊湖地区第四纪玄武岩的 Sr、Nd、Pb 同位素组成及其地幔源区特征. 地质论评, 45(S1): 349~357.

张招崇,李兆鼎,李树才,辛影,李兆木,王先政. 2001. 黑龙江镜泊湖地区特殊类型白榴石碱玄岩的发现及其意义. 地质科学, 36(1): 23~35.

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.

Andronico D, Scollo S, Lo Castro M D, Cristaldi A, Lodato L, Taddeucci J. 2014. Eruption dynamics and tephra dispersal from the 24 November 2006 paroxysm at South-East Crater, Mt Etna, Italy. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 274: 78~91.

Bai Zhida, Xu Debin, Zhang Bingliang, Zhang Tao, Bu Jing. 2006&. Study on type and phase of Quaternary explosive volcanism in Longgang volcanic cluster. Acta Petrologica Sinica, 22(6): 1473 ~ 1480.

Buckland H M, Eychenne J, Rust A C, Cashman K V. 2018. Relating the physical properties of volcanic rocks to the characteristics of ash generated by experimental abrasion. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 349: 335~350.

Buckland H M, Saxby J, Roche M, Meredith P, Rust A C, Cashman K V, Engwell S L. 2021. Measuring the size of non-spherical particles and the implications for grain size analysis in volcanology. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 415: 1~22.

Carpinteri A, Pugno N. 2002. A fractal comminution approach to evaluate the drilling energy dissipation. International Journal for Numerical and Analytical Methods, 26(5): 499~513.

Cas R A F, Wright J V. 1987. Volcanic Successions: Modern and Ancient. London: Allen and Unwin: 1~528.

Chen Hongzhou, Ma Baojun, Gao Feng. 2005&. Characteristics of the Holocene volcano in the Jingpohu region. Earthquake Research in China, 21(3): 360~368.

Chen Jianwen, Wang Defa, Zhang Xiaodong, Li Changshan. 2000&. Analysis of volcanic facies and apparatus of Yingcheng Formation in Xujiaweizi faulting depression, Songliao Basin Northeast China. Earth Science Frontiers, 7(4): 371~379.

Colo’ L, Ripepe M, Gurioli L, Harris A J L. 2020. Fragmentation processes during Strombolian explosions revealed using particle size distribution mapping. Frontiers in Earth Science, 8: 1~10.

Coltelli M, Miraglia L, Scollo S. 2008. Characterization of shape and terminal velocity of tephra particles erupted during the 2002 eruption of Etna volcano, Italy. Bulletin of Volcanology, 70(9): 1103 ~ 1112.

Dufek J, Manga M, Patel A. 2012. Granular disruption during explosive volcanic eruptions. Nature Geoscience, 5(8): 561~564.

Fan Qicheng, Sun Qian, Li Ni, Yin Jinhui, Chen Hongzhou, Gao Feng, Zhang Xijie. 2003&. The section of airfall clastic rock of Holocene volcano in Jingpohu region and its eruptive history. Seismology and Geology, 25(S1): 3~11.

Folk R L. 1974. Petrology of Sedimentary Rocks. Austin: Hemphill

- Publishing Company; 1~184.
- Gjerløw E, Höskuldsson A, Pedersen R-B. 2015. The 1732 Surtseyan eruption of Eggöya, Jan Mayen, North Atlantic: deposits, distribution, chemistry and chronology. *Bulletin of Volcanology*, 77(2): 1~21.
- Freret-Logeril V, Donnadiou F, Eycheu J, Soriaux C, Latchimy T. 2019. In situ terminal settling velocity measurements at Stromboli volcano: input from physical characterization of ash. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 374: 62~79.
- Inman D L. 1952. Measures for describing the size distribution of sediments. *Journal of Sedimentary Petrology*, 22(3): 125~145.
- Jia Jianjun, Gao Shu, Xue Yunchuan. 2002&. Grain-size parameters derived from graphic and moment methods: a comparative study. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 33(6): 577~582.
- Jones T J, McNamara K, Eycheu J, Rust A C, Cashman K V, Scheu B, Edwards R. 2016. Primary and secondary fragmentation of crystal-bearing intermediate magma. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 327: 70~83.
- Jones T J, Russell J K. 2017. Ash production by attrition in volcanic conduits and plumes. *Scientific Reports*, 7(1): 1~12.
- Jones T J, Reynolds C D, Boothroyd S C. 2019. Fluid dynamic induced break-up during volcanic eruptions. *Nature Communications*, 10(1): 1~7.
- Kaminski E, Jaupart C. 1998. The size distribution of pyroclasts and the fragmentation sequence in explosive volcanic eruptions. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 103(B12): 29759~29779.
- Kueppers U, Perugini D, Dingwell D B. 2006. "Explosive energy" during volcanic eruptions from fractal analysis of pyroclasts. *Earth and Planetary Science Letters*, 248(3~4): 800~807.
- Liu E J, Cashman K V, Rust A C. 2015. Optimising shape analysis to quantify volcanic ash morphology. *Geo. Res. J.*, 8: 14~30.
- Liu E J, Cashman K V, Rust A C, Höskuldsson A. 2017. Contrasting mechanisms of magma fragmentation during coeval magmatic and hydromagmatic activity: the Hverfjall Fires fissure eruption, Iceland [OL]. *Bulletin of Volcanology*, 79(10): 1~26.
- Liu Qiang, Wei Haiquan, Xu Jiandong, Luan Peng, Sun Chunqiang, Pan Bo, Zhao Bao, Yu Hongmei. 2009&. Grain-size characteristics of the Sihai tephra sheet and their geological implications. *Seismology and Geology*, 31(1): 112~121.
- Liu Xiang. 1996&. Advances in pyroclastic deposits at present and the main types of the pyroclastic deposits. *World Geology*, 15(1): 1~6.
- Liu Xiang, Sui Weiguo, Xiang Tianyuan. 1999&. Volcanic hazards of four active volcano groups in the northeastern China. *Geological Review*, 45(S1): 196~203.
- Liu Xiang, Lang Jianjun. 2011&. Discovery of volcanic debris—avalanche deposits in Laohei and Huoshao volcanoes, Wudalianchi world geopark, and ascertaining the volcanoes' history and eruptive model again. *Geological Review*, 57(5): 650~658.
- Liu Yongshun, Feng Xiaobing, Nie Baofeng, Peng Nian, Sun Shanping. 2014&. Fractal characteristics and their geneses of pyroclasts from silicic pyroclastic flows of Donglingtai Formation in the Yanhecheng area, Beijing. *Acta Petrologica Sinica*, 30(12): 3671~3680.
- Mandelbrot B B. 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. San Francisco: W. H. Freeman and Company; 1~460.
- Mcmanus J. 1988. Grain size determination and interpretation. In: Tucker, M (ed.), *Techniques in Sedimentology*. Oxford: Blackwell, 63~85.
- Mele D, Dioguardi F. 2018. The grain size dependency of vesicular particle shapes strongly affects the drag of particles. First results from microtomography investigations of Campi Flegrei fallout deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 358: 18~24.
- Miyabuchi Y, Iizuka Y, Hara C, Yokoo A, Ohkura T. 2018. The September 14, 2015 phreatomagmatic eruption of Nakadake first crater, Aso Volcano, Japan: eruption sequence inferred from ballistic, pyroclastic density current and fallout deposits. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 351: 41~56.
- Németh K, Cronin S J. 2011. Drivers of explosivity and elevated hazard in basaltic fissure eruptions: The 1913 eruption of Ambrym Volcano, Vanuatu (SW-Pacific). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 201(1): 194~209.
- Németh K, Cronin S J, Smith I E, Flores J A. 2012. Amplified hazard of small-volume monogenetic eruptions due to environmental controls, Orakei Basin, Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 74(9): 2121~2137.
- Okamura S, Arculus R J, Martynov Y A. 2005. Cenozoic magmatism of the north-eastern Eurasian margin: the role of lithosphere versus asthenosphere. *Journal of Petrology*, 46(2): 221~253.
- Papale P. 1999. Strain-induced magma fragmentation in explosive eruptions. *Nature*, 397(6718): 425~428.
- Paredes-Mariño J, Morgavi D, Di Vito M, de Vita S, Sansivero F, Dueffels K, Beckmann G, Perugini D. 2017. Syneruptive sequential fragmentation of pyroclasts from fractal modeling of grain size distributions of fall deposits: the Cretaio Tephra eruption (Ischia Island, Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 345: 161~171.
- Paredes-Mariño J, Scheu B, Montanaro C, Arciniega-Ceballos A, Dingwell D B, Perugini D. 2019. Volcanic ash generation: effects of componentry, particle size and conduit geometry on size-reduction processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 514: 13~27.
- Perugini D, Speziali A, Caricchi L, Kueppers U. 2011. Application of fractal fragmentation theory to natural pyroclastic deposits: insights into volcanic explosivity of the Valentano scoria cone (Italy). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 202(3~4): 200~210.
- Riley C M, Rose W I, Bluth G J S. 2003. Quantitative shape measurements of distal volcanic ash. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 108(B10): 1~15.
- Rust A C, Cashman K V. 2011. Permeability controls on expansion and size distributions of pyroclasts. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 116(B11): 1~17.
- Saxby J, Rust A, Beckett F, Cashman K, Rodger H. 2020. Estimating the 3D shape of volcanic ash to better understand sedimentation processes and improve atmospheric dispersion modelling. *Earth and Planetary Science Letters*, 534: 1~13.
- Sparks R S J. 1978. The dynamics of bubble formation and growth in magmas: a review and analysis. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 3(1~2): 1~37.
- Turcotte D L. 1986. Fractals and fragmentation. *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, 91(B2): 1921~1926.
- Turcotte D L. 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. Cambridge: Cambridge University Press; 1~416.
- Tyler S W, Wheatcraft S W. 1992. Fractal scaling of soil particle-size distributions: analysis and limitations. *Soil Science Society of America Journal*, 56(2): 362~369.
- Van Otterloo J, Cas R A, Sheard M J. 2013. Eruption processes and deposit characteristics at the monogenetic Mt. Gambier Volcanic Complex, SE Australia: implications for alternating magmatic and phreatomagmatic activity. *Bulletin of Volcanology*, 75(8): 1~21.
- Walker G P L. 1971. Grain-size characteristics of pyroclastic deposits.

- The Journal of Geology, 79(6): 696~714.
- Walker G P L. 1973. Explosive volcanic eruptions: a new classification scheme. *Geologische Rundschau*, 62(2): 431~446.
- Walker G P L. 1983. Ignimbrite types and ignimbrite problems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 17(1~4): 65~88.
- Wang Youpeng, Li Dewen, Wang Jinpeng. 2019&. Analysis on grain size of alluvial sediments in the Qiaojia segment, Upper Yangtze River, based on dynamic image method. *Geological Review*, 65(2): 503~513.
- Wang Yuqin, Yu Hongmei, Xu Jiandong, Chen Zhengquan, Zhao Bo. 2019&. A comparative study on the characteristics of two stages of fallout pumices deposits from the Millennium Eruption of Tianchi volcano in Changbaishan area. *Seismology and Geology*, 41(1): 208~224.
- Yu Hongmei, Xu Jiandong, Lin Chuanyong, Zhao Bo. 2008&. Study on the characteristics of Quaternary volcanic pyroclasts from Nanlongwan volcano, Longgang volcanic cluster, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 24(11): 2621~2630.
- Yu Hongmei, Xu Jiandong, Lin Chuanyong. 2011&. Morphological characterization and terminal velocity of pumice particles erupted during the Millennium Eruption of Changbaishan Tianchi volcano, China. *Seismology and Geology*, 33(2): 440~451.
- Yu Hongmei, Wu Jianping, Xu Jiandong, Lin Chuanyong, Shi Lanbin, Chen Xiaode. 2012&. Microstructural characteristics of the Holocene pumice erupted from Changbaishan Tianchi volcano and their volcanological implications. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 42(S3): 132~144.
- Yu Hongmei. 2013&. Study on structural characteristics of the Holocene pumice erupted from Changbaishan Tianchi volcano and the hazards of tephra fallout. Supervisor: Wu Jianping. Beijing: Study report of post - doctor of Institute of Geophysics, China Earthquake Administration: 1~69.
- Zhang Bingliang, Bai Zhida, Hong Hanjing, Xu Debin, Pan Xiaodong. 2005&. A fractal study on the pyroclasts from the Longgang volcano, Jilin Province. *Seismology and Geology*, 27(3): 462~469.
- ZhangYouxue. 1999. A criteria for the fragmentation of bubbly magma based on brittle failure theory. *Nature*, 402(6762): 648~650.
- Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucui, Xin Ying, Li Zhaomu, Wang Xianzheng. 1999&. Sr, Nd and Pb isotopic compositions of Quaternary basalts in the Jingpo Lake area and characteristics of the mantle source. *Geological Review*, 45(S1): 349~357.
- Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucui, Xin Ying, Li Zhaomu, Wang Xianzheng. 2001&. Discovery of a special type of leucite tephrite in Jingpohu region of Heilongjiang Province and its significance. *Chinese Journal of Geology*, 36(1): 23~35.
- Zhao Bo, Xu Jiandong, Yu Hongmei. 2010&. Grain-size characteristics of pyroclasts in Changbaishan Mountain area. *Seismology and Geology*, 32(2): 233~243.

Study on formation mechanism of fallout deposits in Hamatang volcano, Jingpo Lake area, Heilongjiang

GUO Lei, LIU Yongshun, NIE Baofeng, HUANG Zhicong, HOU Peng, LI Yao, GUO Xexin

College of Resource, Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing, 100048

Abstract: The grain size, shape and distribution characteristics of pyroclasts contains their formation mechanism and environmental information during eruption. Based on the field geology and petrography of a fallout deposit section of Hamatang volcano in Jingpo Lake area, the distribution of particle size, the geometry of particle shape and their fractal characteristics of pyroclasts are quantitatively studied by particle size analysis theory and fractal theory. The particle size distribution of pyroclasts in Hamatang volcano is unimodal, and the particle size peak of fallout scoria formed by magmatic explosion is small, while the particle size peak of pyroclasts in the interlayer with fine-grained granite clasts formed by phreatomagmatic eruption is large. The sphericity, aspect ratio and convexity of the fallout scoria particles is less than the one of pyroclasts in the interlayer with fine-grained granite clasts, which indicates the relatively irregular characteristics of the fallout scoria particles. The multi-segment power-law method is used to fit the distribution law of pyroclastic particles in Hamatang volcano. It is found that there are four power-law distribution segments of fallout scoria particles (i. e. corresponding to four fractal dimension values), which are caused by the initial fragmentation of magma, the secondary fragmentation in volcanic channel and the sorting effect of wind. The distribution of pyroclasts in the interlayer with fine-grained granite clasts has two power-law distribution segments (i. e. corresponding to two obviously different fractal dimension values), and the formations of scoria and granite clasts are caused by different fragmentation mechanisms.

Keywords: Hamatang volcano; fallout deposits; grain-size distribution and shape analysis; fractal dimension; formation mechanism

Acknowledgements: This study was financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41372343, 40872062)

First author: GUO Lei, female, born in 1997, postgraduate, major in physical geography; Email: 15732188797@163.com

Corresponding author: LIU Yongshun, male, born in 1966, Ph. D., associate professor, is mainly engaged in volcanology, petrology, geological fluid mechanics and complexity science in geosystems; Email: cnu901@126.com

Manuscript received on: 2022-03-17; Accepted on: 2022-08-26; Network published on: 2022-09-20

Doi: 10.16509/j.georeview.2022.09.055

Edited by: ZHANG Yuxu

乐山市建筑用砂石土矿资源规划的思考

张航飞^{1,2)}, 梁成¹⁾, 何永刚¹⁾, 竹合林¹⁾

1) 四川省地质矿产勘查开发局二零七地质队, 四川乐山, 614000;

2) 张金元劳模创新工作室, 四川乐山, 614000



关键词: 砂石资源; 四川乐山

2020年发布的自然资源部〔2020〕43号文件强调,新一轮矿产资源规划编制须把握优化资源勘查开发保护布局与结构、推进资源高效利用、加快矿业绿色发展等编制重点(自然资源部办公厅,2020)。新一轮矿产资源规划与上一轮矿产资源规划相比,在划定禁止开采区和限制开采区、砂石土类矿产开发、矿山环境保护与修复等方面都有所不同(韩宝富等,2020)。根据“十四五”期间加快“成渝双城经济圈”和“一干多支”建设的社会经济发展需求,乐山市石灰岩、玄武岩等销售目的地将向成渝方向转移,为其提供资源保障,有利于产业体系构建。随着乐山市建设项目的增多,生态环境、基本农田及各类自然保护区等因素的制约和部分矿山资源面临枯竭等问题,加之成渝地区的资源需求,将不能满足各类建设工程项目的砂石需求,供应问题急需解决。

根据乐山市建筑用砂石土矿资源禀赋条件、勘查开发利用现状调查成果,分析了“十四五”期间建筑用砂石土矿资源的供需形势,并在建筑用砂石土矿资源的总体布局提出了规划建议与设想。建筑用砂石土矿规划专题研究成果可支撑服务于乐山市第四轮矿产资源规划工作与保障成渝地区的资源需求。

1 矿产资源概况

乐山市域具有成矿条件较好、矿产种类多、矿产资源相对集中的特点。区内优势矿产有磷、岩盐、石灰岩和陶瓷建材原料等。区内已发现非金属矿种、金属矿产、水气矿产以及能源矿产等38种。根据矿产资源分布相对集中的特点,已基本建成四川省马边磷矿基地、犍为井研岩盐矿原料基地、五通盐化工基地、峨眉山地区水泥生产基地、夹江陶瓷建材基地等5大基地。

乐山市建筑用砂石土类矿产资源主要分布在峨眉山市、峨边县、沐川县、夹江县等地区,主要有建筑石料用灰岩、建筑用玄武岩、建筑用白云岩、建筑用砂岩、砖瓦用黏土岩及页

岩等类型,开采方式为露天开采,开发利用条件较好。截止2019年底,乐山市已设建筑用砂石土矿采矿权113个,其中生产矿山54个,停产矿山54个,在建矿山5个。大中型矿山42个,小型矿山71个。区内各类砂石土矿保有资源量约146.60 Mt。根据2019年实际生产量统计,砂石土矿业经济总产值约1.28亿元。

2 资源供需分析

“十四五”矿产资源规划期基期为2020年,目标年2025年。“十四五”时期,乐山市规划工程建设类项目包括交通工程项目、城镇建设项目、水利设施建设和房地产建设项目和外销成都地区等(表1)。其中成都周边砂石骨料主产地如汶川、都江堰、什邡、绵竹等区域环保整治后受大规模停产整顿等管控影响出现大幅减产,成都外源骨料来源范围逐步扩大至150~200 km外的南充、乐山、绵阳、遂宁、雅安等区域。可以预见成都区域未来砂石骨料的本地供应规模及持续稳定性将大幅下滑,外源性供应支撑将成为主要来源方式,将由过去的成都本地及周边河道资源分布区域,逐步转变外源性机制砂开采密集区域。峨眉山、乐山、什邡、广安、绵阳、雅安等方向将具备运距优势,其中预计绵阳市2025年底砂石矿山数量45个,年产能65 Mt,乐山市2025年底砂石矿山数量55个,年产能65 Mt,雅安市2025年底砂石矿山数量50个,年产能48 Mt。绵阳、乐山、雅安等市通过区域协调,可为川藏铁路、成渝中线等重点工程、成都平原地区基础设施和所在地建设提供资源保障,同时也符合四川省机制砂石矿石总数和开采产能的规划。目前,乐山市建筑用砂石矿基本在市内各区县之间销售,部分建筑用玄武岩矿、石灰岩矿销往成都。未来几年,乐山地区具备对成都骨料供应形成主导权或控制权的可能性,乐山市将积极融入“成渝地区双城经济圈建设”,成为西南片区建筑用砂石矿销售基地。根据《乐山市“十四五”规划基本思路》、《乐山市十四五期间重大项目储备计划》,预测建筑用石灰岩年需求量最大,约56.50