

吉林金龙顶子火山空降堆积物 体积估算及其地质意义

李 智¹, 韩 松², 邓亚平³, 张 晔⁴, 于福生⁵

(1. 甘肃省地质矿产局 第二勘查院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100039; 3. 华北石油勘探
开发研究院, 河北 任邱 062552; 4. 甘肃省地质调查院, 甘肃 兰州 730000; 5. 石油大学 资源与信息学院, 北京 102249)

[摘要] 用梯形法、对数坐标直线交叉法、厚度对数 面积平方根法对吉林龙岗金顶子火山四海期空降堆积物
的体积进行了估算, 结果分别为 0.096 km^3 , 0.138 km^3 , 0.1095 km^3 , 与 Los Alamos National Laboratory 开发的
火山喷发模拟软件模拟的结果(0.105 km^3) 相近。对比分析认为: 梯形法存在的主要问题是忽略了最后一条等
厚线与零点等厚线间的体积, 从而低估了实际喷出量; 对数直线交叉法虽然减少了厚度与面积间的非线性相关
性, 但获得的两条直线具有相当大的主观性; 厚度对数 面积平方根法是在空降堆积物随着远离火山口呈指数性
减薄的事实基础上提出的, 是比较准确的体积估算方法。

[关键词] 龙岗山脉; 金龙顶子火山; 空降堆积物; 体积估算; 吉林省

[中图分类号] P588.14 [文献标识码] A [文章编号] 1672-6561(2006)01-0028-04

Calculation of Fallout Tephra Volumes in Sihai Phase of Jinlongdingzi Volcano of Longgang Volcanic Swarm in Jilin Province

LI Zhi¹, HAN Song², DENG Ya ping³, ZHANG Ye⁴, YU Fu sheng⁵

(1. Second Institute of Geological Survey, Gansu Bureau of Geology and Minerals, Lanzhou 730000, Gansu, China;
2. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3. Institute of Exploration and
Development of Huabei Oil Field, Renqiu 062552, Hebei, China; 4. Institute of Geological Survey of Gansu Province,
Lanzhou 730000, Gansu, China; 5. School of Resource and Information, Petroleum University, Beijing 102249, China)

Abstract Three methods, the trapezoidal rule, the straight lines on log log plots of area versus thickness and the
straight lines on plots of log thickness versus square root of area, of calculating volumes of fallout tephra deposited in Si
hai Phase of Jinlongdingzi Volcano of Longgang Volcanic Swarm in Jilin Province are applied in this paper. The calculated
results are 0.096 km^3 , 0.138 km^3 and 0.1095 km^3 respectively. Contrasting with the result (0.105 km^3) of volcanic eruption
program by Los Alamos National Laboratory, the last method is considered the best calculation, and the problems of the
other two methods are discussed. The method using straight lines on plots of log thickness versus square root of area is re
cognized to be relatively reasonable because volcanic deposits decrease exponentially with distance from volcano center.

Key words: Longgang Mountain; Jinlongdingzi Volcano; fallout tephra; volume calculation; Jilin Province

0 引言

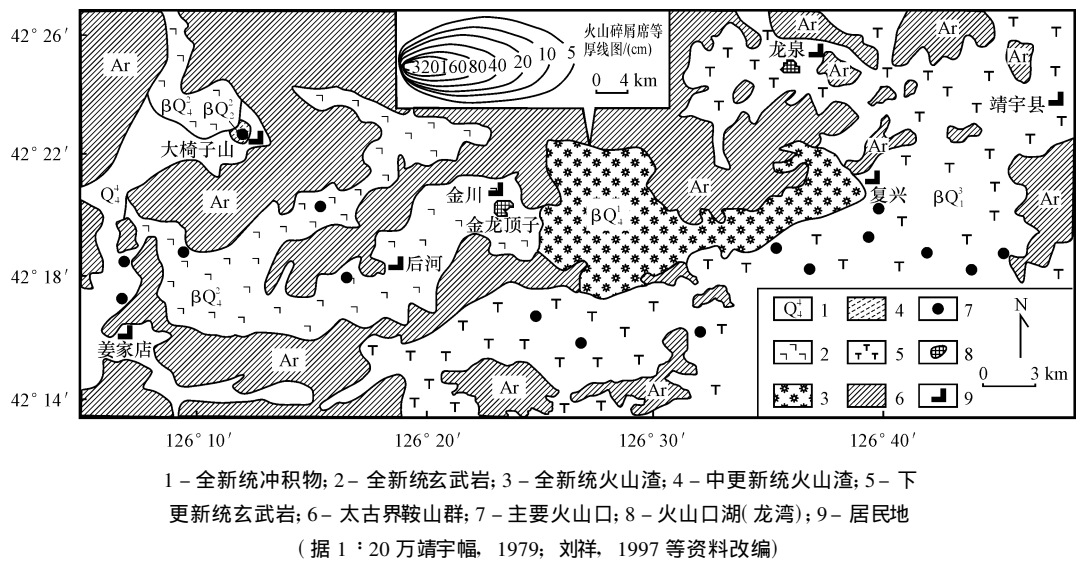
龙岗火山群位于吉林省辉南—靖宇县境内, 地

处龙岗山脉中段, 在近 1700 km^2 内星罗棋布约 160
多座火山口、火山口湖(龙湾)和火山锥^[1], 是中国东
北著名的活火山群之一。金龙顶子火山位于龙岗火
山群的中部, 距辉南县金川乡东南约 2.5 km (图 1),

[收稿日期] 2005-03-20

[基金项目] 中国科学院重点发展方向项目(KJ9XN-1)

[作者简介] 李智(1965-), 男, 甘肃会宁人, 工程师, 从事基础地质研究。



海拔 999.4 m, 比高约 240 m, 是研究区内最高的一座活火山。发生在 1 500 多年前的亚普林尼式火山爆发所形成的空降堆积物组成金龙顶子玄武质火山渣锥及其东侧分布在四海林场—复兴一带的火山碎屑席^[2], 统称为四海火山渣层^[3], 喷发期次为四海期^{4-5]}。前人对此次火山喷发的岩石学、地球化学、年代学特征^[5-7] 均进行过较为详细的报道, 而对于该期火山喷发产生的空降堆积物的体积估算研究不多, 且估算的体积总量存在较大的差别(0.024 km³ 和 0.048 km³)^[2], 这将直接影响火山排气量的估算及其产生的环境效应评价。笔者在前人工作的基础上^[2], 利用梯形法、对数坐标直线交叉法、厚度对数-面积平方根法对四海期火山空降物的体积(不包括火山渣锥的体积)进行了详细地计算和讨论, 最后认为厚度对数-面积平方根法是较为理想的火山空降堆积物体积的估算方法。

1 梯形法

1.1 原理

梯形法是一种简单易用的数学积分方法, 根据两条相邻等厚线的厚度(T_{n+1} , T_n)和其圈闭的面积(A_{n+1} , A_n)便可求出它们之间的体积^[8]

$$\Delta V_{n+1} = T_{n+1}(A_{n+1} - A_n) + \frac{1}{2}(T_n - T_{n+1}) \cdot (A_{n+1} - A_n) = \frac{1}{2}(T_{n+1} + T_n)(A_{n+1} - A_n) \quad (1)$$

式(1)中的面积相当于一个矩形面积加上一个三角

形面积(图 2)。从图 2 中明显可以看出高估了喷出物的体积, 但如果等厚线间距比较小时, 估算结果偏差不会太大。

1.2 计算结果

根据前人发表的金龙顶子火山四海期空降堆积物的等厚线图^[2], 利用

Canvas 软件计算出的每条等厚线圈闭的面积如表 1, 分别选择 8 条、6 条、4 条等厚线作出的厚度-面积投影图表现出强烈的非线性特征(图 3), 利用梯形法计算出的累计体积随着等厚线条数的减少而逐渐增大(表 1), 说明等厚线越稀疏, 计算出的结果偏差可能越大。

表 1 梯形法计算金龙顶子火山空降物体积

Tab.1 Evaluated Volume of Jinlongdingzi Fallout Tephra by the Liner Scale and the Trapezoidal Rule

d/cm	A/km^2	不同数目等厚线累计体积 V/km^3		
		8 条	6 条	4 条
640	1.25	0.008	0.008	0.008
320	6.06	0.031	0.031	
160	11.90	0.045		
80	25.89	0.062	0.071	0.097
40	46.98	0.074		
20	82.75	0.085	0.099	0.125
10	126.45	0.092	0.106	
5	182.76	0.096	0.110	0.138

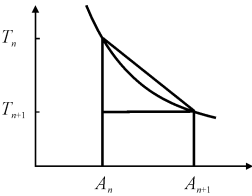


图 2 梯形法计算体积原理
Fig.2 Liner Scale and the Trapezoidal Rule

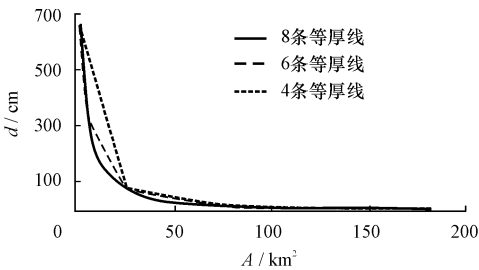


图 3 金龙顶子火山空降物厚度-面积投影图
Fig. 3 Thickness Versus Area for Jinlongdingzi Volcano

2 对数坐标直线交叉法

2.1 原理

为减少数据的非线性相关性, 可将获得的等厚线和其圈闭的面积数值在对数坐标系内投影 (图 4), 得出两条相互交叉的直线。Rose 等最早提出利用对数坐标系内两条交叉的直线来计算喷出物的体积^[9]。基本原理是假设面积与厚度符合幂函数定律, 即

$$A = A'_0 T^{C_1} \quad 0 \leq T \leq T_{ip}$$
$$A = A''_0 T^{C_2} \quad T_{ip} \leq T < \infty$$
$$A'_0 T^{C_1} = A''_0 T^{C_2} \equiv A_{ip}$$

(2)

(3)

式(2)式(3)中 A_{ip} 和 T_{ip} 为两条直线交叉点的厚度和面积, C_1 和 C_2 分别为两条直线的斜率。据式(2), 当厚度趋向于零, 面积趋向于无穷; 反之亦然, 所以必须 $C_1 < 0$, $C_2 < 0$ 。喷出物的体积可通过积分求出

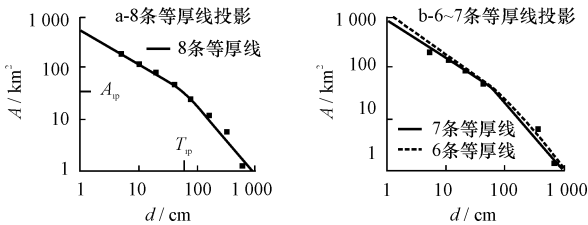


图 4 金龙顶子空降堆积物厚度-面积对数坐标投影
Fig. 4 Log Thickness Versus Area for Jinlongdingzi Volcano

$$V = \int_0^\infty A dT = \int_0^{T_{ip}} A'_0 T^{C_1} dT + \int_{T_{ip}}^\infty A''_0 T^{C_2} dT =$$
$$\frac{A'_0}{C_1 + 1} [T^{C_1 + 1}]_0^{T_{ip}} + \frac{A''_0}{C_2 + 1} [T^{C_2 + 1}]_{T_{ip}}^\infty \quad (4)$$

为了保证式(4)的值在极限 0 和 ∞ 时非无限性, 必须使 $C_1 + 1 > 0$, $C_2 + 1 < 0$, 结合前述条件, 可得出: $-1 < C_1 < 0$, $C_2 < -1$ 。满足这些条件时, 式(4)可为

$$V = \frac{A'_0}{C_1 + 1} T_{ip}^{C_1 + 1} - \frac{A''_0}{C_2 + 1} T_{ip}^{C_2 + 1} =$$
$$A_{ip} T_{ip} \left[\frac{1}{C_1 + 1} - \frac{1}{C_2 + 1} \right] \quad (5)$$

2.2 计算结果

根据金龙顶子火山四海期空降堆积物的等厚线和其圈闭的面积数值, 在对数坐标系内投影, 求出两条直线的斜率和交叉点的厚度、面积, 利用式(5)求得喷发物的体积(表 2)。结果表明, 随着等厚线条数的减少, 计算的体积逐渐增大。

表 2 对数-直线交叉法计算
金龙顶子火山空降堆积物体积

Tab. 2 Evaluated Volume of Jinlongdingzi Fallout tephra by the Log log Scale and Two Straight lines Approximation

等厚线条数	$\frac{A'_0}{\text{km}^2}$	C_1	$\frac{A''_0}{\text{km}^2}$	C_2	$\frac{T_{ip}}{\text{cm}}$	$\frac{A_{ip}}{\text{km}^2}$	$\frac{V}{\text{km}^3}$
8	567.48	-0.68	7 368.8	-1.30	62.5	34.1	0.138
7	653.18	-0.72	7 235.1	-1.30	63.2	33.0	0.144
6	855.85	-0.82	20 056.7	-1.48	119.0	17.0	0.155

3 厚度对数-面积平方根法

3.1 原理

由于火山空降物的厚度随着远离火山口的距离呈指数衰减, 厚度的对数与该等厚线所圈闭的面积相等的圆半径亦呈指数性衰减^[10], 因此 Pyle^[11] 提出用厚度的对数和面积的平方根建立坐标系, 将空降物的不同等厚线及其所圈闭的面积值在该坐标系内投影, 会得到一条直线。厚度与面积间的关为

$$T = T_0 \exp(-KA^{1/2})$$

(6)

式中: T_0 为 $A = 0$ 时的厚度; $-K$ 为等厚线和面积的数值在 $\ln T - A^{1/2}$ 坐标系内投影所得到的直线斜率, 可用下式计算

$$-K = \frac{\ln T_b - \ln T_a}{A_b^{1/2} - A_a^{1/2}}$$

(7)

空降堆积物的体积可通过积分求得

$$V = \int_0^\infty T dA = \int_0^\infty T d(A^{1/2})^2$$

(8)

将式(6)代入式(8)得

$$V = \int_0^\infty 2T_0 \exp^{-KA^{1/2}} A^{1/2} dA^{1/2} =$$
$$\frac{2T_0}{K^2} [(KA^{1/2} + 1) \exp^{-KA^{1/2}}]_0^\infty = \frac{2T_0}{K^2} \quad (9)$$

3.2 计算结果

金龙顶子火山四海期空降堆积物的等厚线及其圈闭的面积在厚度对数-面积平方根坐标系内投影结果如图 5, 利用式(9)求得空降堆积物的体积为 0.1095 km^3 。如果去掉靠近火山口附近的两个点, 得到的体积为 0.1105 km^3 , 增加 0.001 km^3 , 与前两种方法相比误差较小。

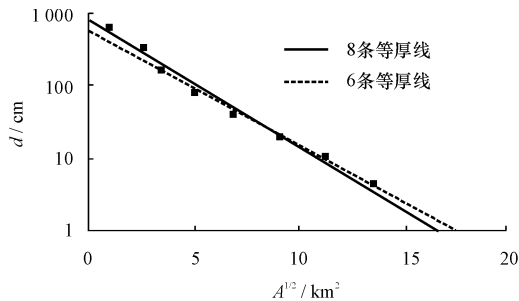


图 5 金龙顶子火山厚度对数-面积平方根图解

Fig.5 Log Thickness Versus area^{1/2} for Jinlongdingzi Volcano

4 讨论

由于火山空降堆积物的厚度与其对应的面积之间存在非线性函数关系, 加之等厚线为零的区域和火山口附近的厚度(因垮塌、侵蚀、覆盖等作用)都很难确定, 因此用函数积分的方法计算出的体积仍存在一定的误差。Froggt^[8], Judy Fierstein^[11]等对上述 3 种方法曾进行过评述。通过对金龙顶子火山空降堆积物体积的估算结果分析, 梯形法存在的主要问题是忽略了最后一条等厚线与零点等厚线间的体积, 从而低估了实际喷出的体积。如果等厚线的条数太少, 间距过大, 就会高估实际喷出的体积。用 6 条、4 条等厚线计算的体积分别比用 8 条等厚线计算的体积增加 14% 和 21%。对数直线交叉法虽然减少了厚度与面积间的非线性相关性, 但获得的两条直线具有相当大的主观性, 事实上在图 4a 中可以绘出几组具有不同斜率的交叉直线, 由其计算出的面积显然不同。当最薄的等厚线减少时, 计算的结果明显增加, 如用 7 条、6 条等厚线计算的体积(图 4b)比用 8 条等厚线计算的结果分别增加 4.3% 和 12.3%。与梯形法计算结果相比, 高估 43%。厚度对数-面积平方根法是在空降堆积物随着远离火山口呈指数性减薄的事实基础上提出的, 比较符合野外实际, 而且不要求考虑等厚线形状是否为圆形或椭圆形, 计算的结果偏差很

小, 因此, 是一种比较理想的估算火山空降堆积物体积的方法。上述 3 种方法估算的金龙顶子火山空降堆积物的体积(8 条等厚线)分别为 0.096 km^3 , 0.138 km^3 , 0.1095 km^3 , 虽然有一定差别, 但比较接近, 利用 Los Alamos National Laboratory 开发的火山喷发模拟软件模拟的结果表明, 空降物体为 0.105 km^3 时, 等厚线的分布特征与野外调研结果相似, 说明估算的结果是可信的。此次体积估算的结果, 对火山喷发柱动力学的模拟恢复具有重要意义, 因为火山空降物的体积是数值模拟的主要参数。利用这次结果模拟的四海期喷发柱气冲区高度为 10.5 km 、伞状区高度为 13.8 km 。碎屑席扩散范围约为 23 km , 碎屑席平面展布形状表现为以喷火口为对称中心的椭圆形, 碎屑厚度在火口中心最厚可达 6 m 。等厚线分布形态与野外调研结果相符, 相同等厚度参数相差不超过 5%。如果以前人估算的体积结果(0.024 km^3 , 0.048 km^3)进行模拟, 最大堆积厚度不足 1 m , 这会降低对火山灾害程度的评价, 影响火山灾害区划的划分及其相关预防措施的制定。

[参 考 文 献]

- [1] 欧祥喜. 龙岗火山群的形成与构造的关系[J]. 吉林地质, 1984, 3(1): 76-81.
- [2] 刘 祥, 张成梁. 龙岗火山群四海期火山渣层——来自金龙顶子火山亚普林尼式火山喷发[J]. 吉林地质, 1997, 16(3): 1-8.
- [3] 吉林省地矿局. 靖宇县幅(1:20 万)区调报告[R]. 长春: 吉林省地矿局, 1979: 101-116.
- [4] 王彦生, 靳 克. 吉林省新生代龙岗火山群期次划分及火山喷发类型特点[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 332-337.
- [5] 刘 祥, 向天元, 王锡魁. 长白山地区新生代火山活动分期[J]. 吉林地质, 1989, 8(1): 30-41.
- [6] 樊棋诚, 刘若新, 魏海全, 等. 龙岗金龙顶子近代活动火山的岩石学与地球化学[J]. 岩石学报, 1999, 15(4): 584-589.
- [7] 史兰斌, 林传勇, 韩秀伶. 吉林龙岗火山群金龙顶子火山喷发物中幔源包体的基本特征及其地质意义[J]. 地质论评, 1999, 45(增刊): 308-317.
- [8] Froggt P C. Review of Methods of Estimating Rhyolitic Tephra Volumes: Applications to the Taupo Volcanic Zone New Zealand[J]. J Volcanol Geotherm Res. 1982, 14: 301-318.
- [9] Rose W I Jr, Bonis S, Stoiber R E, et al. Studies of Volcanic Ash from Two Recent Central American Eruptions[J]. Bull Volcanol, 1973, 37: 338-364.
- [10] Pyle D M. The Thickness, Volume and Grain Size of Tephra Fall Deposits[J]. Bull Volcanol, 1989, 51: 1-15.
- [11] Judy Fierstein, Manuel. Another Look at the Calculation of Fallout Tephra Volumes[J]. Bull Volcanol, 1992, 54: 156-167.