

山东山旺中新世火山喷发对生物生存环境的影响

郭正府* 刘嘉麒 陈晓雨

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

摘要 山东临朐山旺及其邻区广泛出露中新世基性火山岩, 并保存完整的火山机构, 与之同时代的玛珥湖位于这些基性火山岩的环绕之中. 玛珥湖内保存了完整的沉积序列, 湖相沉积物中赋存有丰富的、种类繁多的、保存异常完好的动植物化石. 研究表明, 本区玄武质火山岩属于裂隙式和受断裂控制的中心式火山活动的产物. 在对研究区火山岩及其玛珥湖沉积物内呈稀疏状态的火山灰系统取样的基础上, 利用电子探针分析方法, 重点开展了山旺中新世玄武质火山喷出气体成分和含量的实验室定量测试研究. 测试结果表明: 山旺地区中新世玄武质火山喷出的 S, Cl, F 和 H₂O 含量分别为 0.18~0.24, 0.03~0.05, 0.03~0.05 和 0.4~0.6 wt%(质量分数); 与世界上其他地区的火山活动相比, 山旺中新世火山喷出气体 S 的含量较高. 山旺中新世火山喷出气体(包括 S, Cl 和 F)对当时周围地区的环境变化造成了严重影响, 火山喷发除喷出大量氟化物气体导致周围地区动物死于氟中毒外, 还喷出了以 S 和 Cl 及其化合物为主要成分的火山气体造成当时火山盆地内温度急剧下降、形成酸雨, 甚至破坏大气臭氧层. 山旺中新世火山活动的综合环境效应能够引起周围地区生物非正常死亡或集群死亡级别的环境变化, 可以导致山旺火山盆地内生物大批死亡. 山旺玛珥湖沉积物内保存异常完好的动植物化石多数赋存在富含火山灰的页岩中, 并且其上覆的页岩中火山灰含量也较高. 这些证据支持火山活动导致了本区生物非正常死亡或集群死亡, 并被其后火山喷出的火山灰快速覆盖和埋葬, 形成保存完好的山旺古生物化石.

关键词 火山气体 古环境 酸雨 玄武岩 山旺

近几年随着对玄武质火山作用导致环境变化的深入了解, 国际上在该领域的工作重点逐渐转向新生代(包括历史时期)中小型裂隙式和受断裂控制的串珠状中心式玄武质火山喷发对环境影响的研究, 其主要原因是: (1)新生代火山区的后期覆盖和破坏相对较弱, 岩石新鲜, 为详细开展玄武质火山熔岩流侵位和空间分布研究提供了可能^[1], 同时这也是定量探讨玄武质火山活动引起环境效应的地质基础和初始条件. (2)对中小型裂隙式和受断裂控制的串珠状中心式基性火山喷发的环境效应深入解剖可以为定量研究大火山岩省对环境的影响提供许多有价值的边

界参数^[2]. (3)地史时期许多裂隙式和受断裂控制的串珠状中心式基性火山喷发主要出现在板内相对封闭的构造环境, 那里同时也是生物聚集的场所, 然而这些中小型火山喷发对其附近地区环境和生物生存的影响以往一直缺乏深入研究^[3]. 近期国外研究和历史资料记载^[4~6]表明, 公元 1783~1784 年冰岛 Laki 火山活动属于典型的中小型裂隙式玄武质火山喷发, 它喷出的大量火山气体弥漫在冰岛上空, 污染了岛上及附近地区的草原植被, 导致所有吃过当地青草的羊群死于氟中毒, Laki 火山的这次喷发对冰岛及其周围地区的气候和环境产生了极其严重的影响, 最终

造成大批生物(包括人)死亡. 这一研究实例对进一步深入探讨中小型裂隙式和受断裂控制的串珠状中心式基性火山喷发对其附近地区环境和生物生存的影响具有重要意义^[5]. 中国山东省山旺及其邻区广泛出露中新世基性火山岩, 属于玄武质裂隙式和受断裂控制的中心式火山活动^[7]; 并且与之同时代山旺玛珥湖沉积物中赋存有丰富的、保存完好的古生物化石, 通过野外观察以及与辽西地区^[8]比较, 初步认为是生物非正常死亡或集群死亡的结果(详见后述). 作者通过对山旺火山区内玛珥湖沉积物和火山喷发物的野外考察发现, 研究区火山喷发物和富含生物化石的玛珥湖沉积物空间出露面积较大, 化石保存完好, 与火山喷发物的野外对应关系清晰, 剖面层序出露完整, 是在中国研究新生代火山活动环境效应的理想场所. 虽然过去对山旺火山活动开展了诸多工作^[9~16], 但侧重于火山地质学和地球化学方面的研究, 而对火山喷出气体及其气溶胶的环境效应方面尚未见研究报道. 本文从玄武质裂隙式火山活动对古环境影响的角度, 具体探讨了山旺中新世火山喷发对生物生存环境影响的方式、程度与机理. 我们利用火山喷发物斑晶矿物内岩浆包裹体和共存基质玻璃的实验室测试数据和分析结果证实: 山旺中新世火山喷发能够对当时古环境造成足以引起生物集群死亡级别的灾难性影响, 从定量的角度初步论证了山旺火山活动是造成该区生物大规模集群死亡的主要原因. 并且, 本研究系统公布了山旺中新世火山喷出的气体成分中硫化物和氯化物混合气体含量比国际上相同成分的裂隙式火山活动和受断裂控制的中心式火山喷发(如公元 1783~1784 年冰岛 Laki 火山喷发)喷出的混合气体含量明显得高, 这是中国第一个定量研究玄武质裂隙式火山喷发造成环境灾害和生物大规模死亡的地质实例.

1 山旺火山地质简况

山旺火山区位于郯庐断裂的中段^[17], 火山岩以玄武质熔岩为主, 出露面积约为 240 km² (图 1), 火山岩的年龄以 10~16 Ma 居多^[10,17], 属中新世火山喷发. 区内岩石新鲜, 保留完好的火山机构和玛珥湖. 受断裂控制的中心式火山锥呈线状展布; 部分地区火山活动强烈, 呈现裂隙式喷发的特点^[9,17]. 野外观察研究表明: 山旺火山区属于玄武质裂隙式火山活动和受断裂控制的中心式火山活动. 火山区内出露丰富

的古生物(例如, 哺乳动物和植物等)化石, 化石种类多、数量大、保存完整, 它们赋存在湖相富含硅藻土和火山碎屑(以火山灰为主)的沉积物中. 这些富含化石的硅藻土被认为是中新世玛珥湖沉积物^[7], 它们被周围同时代玄武质火山岩包围(图 1).

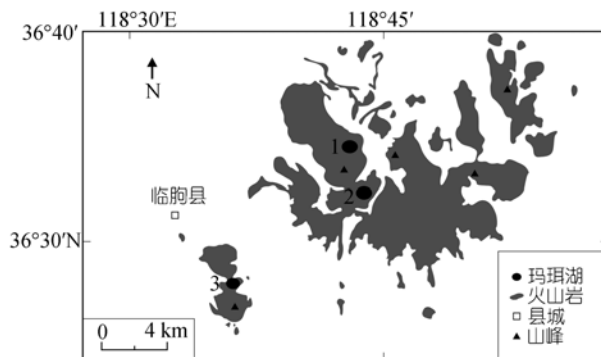


图 1 山东山旺中新世火山岩分布简图

据文献^[18]修改. 玛珥湖: 1. 包家河; 2. 谢家河; 3. 青山

2 山旺火山区中新世生物非正常死亡的主要证据

至今山旺火山区已发现的古生物化石达十几个门类 600 余种^[19], 分为植物和动物两大群体. 植物化石包括藻类、苔藓、蕨类、裸子和被子植物等. 动物化石门类众多, 包括无脊椎动物和脊椎动物. 无脊椎动物化石主要包括昆虫、蝎类、蜘蛛、介形和腹足等, 其中昆虫的种类最多、化石数量也最大; 脊椎动物化石有鱼类、两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类. 山旺化石的最大特点是其数量大、种类多、个体保存异常完好、化石结构清晰, 并且一些化石的形态十分生动^[19]. 不同种属的生物化石往往出现在玛珥湖沉积物的同一层位中, 并且化石出露的密度较大, 有些动物化石甚至保留着死亡之前挣扎的姿势^[19]. 例如, 个体相差较大但保存完好的鱼类化石常常成群地埋藏在一起, 好似往来嬉戏, 翱翔浅底, 栩栩如生^[19,20]; 一些个体较大的化石, 如柄杯鹿、三角原古鹿和东方熊等, 其四肢躯干的骨架保存完整, 有些化石甚至具有保存完好的皮毛和胃中未消化的食物, 足可清晰辨认^[19]. 鸟类因适应在空中飞翔的生活方式, 骨壁薄而中空, 它们赖以生存的森林环境更是难以将其保存为化石, 个体大的鸟类保存为完整的化石就更难. 然而, 山旺火山区出露了许多保存完好的鸟类化石, 并且有的个体较大, 例如山旺山东鸟、临朐鸟和中华河鸭等.

山旺火山区的玛珥湖沉积物中还保存有具清晰叶脉的树叶化石、蝙蝠的翼膜化石、蜘蛛的足毛化石、蜻蜓的羽翅化石和鼠的须毛化石等等, 就连极难形成化石的蝌蚪、青蛙、蝾螈、蜜蜂、花朵都保存为原态, 有的还保存了绚丽的色彩, 如同实体标本一样逼真^[19]. 山旺玛珥湖沉积物内保存异常完好的动植物化石多数赋存在富含火山灰的硅藻土页岩中, 并且其上覆的页岩中火山灰含量也较高, 说明同时期具有较大规模的火山喷发. 与这些火山灰对应的火山

喷发喷出了高含量的有害火山气体(详见后述), 因此, 有理由认为火山喷发形成的火山灰(尘)与湖相沉积物一起快速沉降, 将死亡的生物迅速掩埋, 从而保存了完整化石. 上述高密度出露的、形态各异的、保存异常完整的、个体相差较大且不同种属的生物化石往往出露于本区玛珥湖同一层沉积物中的特征, 可能不是生物正常死亡的结果, 我们初步认为属于生物非正常死亡或集群死亡, 指示生物的死亡是与某一突变事件相关联.

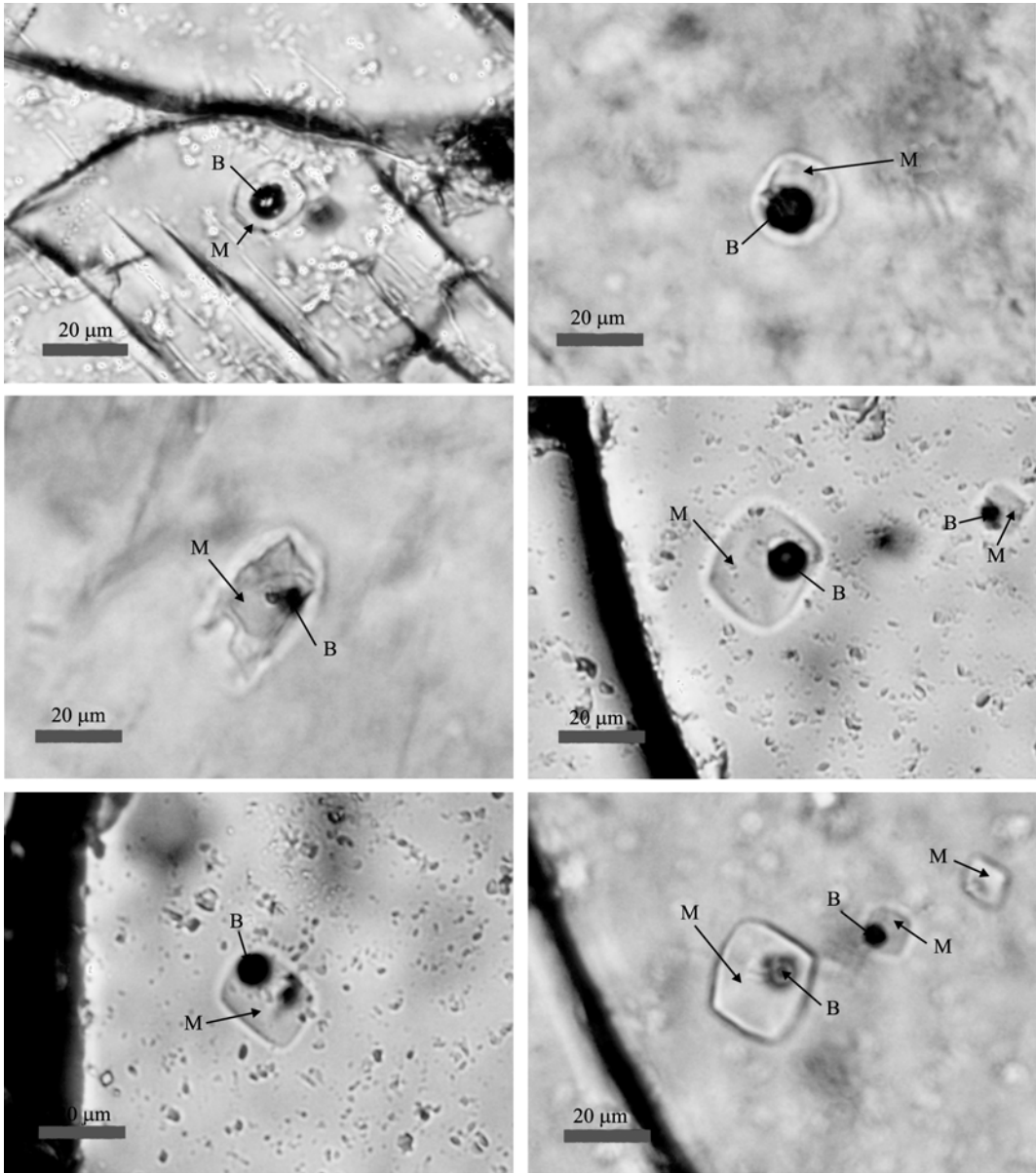


图 2 长石晶屑中的岩浆包裹体
B 为气泡; M 为岩浆包裹体

3 样品的挑选及其实验室测试方法

利用显微镜选取斑晶(或晶屑)矿物和共存基质玻璃均新鲜并且全岩烧失量低(小于 2%)的火山岩样品,挑选原生岩浆包裹体含量较高并且易识别的斑晶(或晶屑)矿物(主要是斜长石和辉石),清洗矿物表面,观察矿物内包裹体的分布特征(图 2),选定形状规则、保存完好且一直处于封闭状态的岩浆包裹体和新鲜的基质玻璃样品并用树胶将其镶嵌在样品槽内,抛磨直至获得包裹体的最大横截面,然后利用电子探针进行主量元素氧化物和火山挥发分组分(即S, Cl和F)含量测定. 样品测试过程中选定电压 15 kV、电流 5~15 nA、电子束直径 1~10 μm(岩浆包裹体)和 10~20 μm(基质玻璃). 每测定 3 个样品点,重复测试标样一次,以保证整个实验过程中稳定的测试精度和准确度. 水的含量通过“差异法”获得^[21]. 样品的挑选及其火山挥发分组分的实验室详细测试程序和方法,可参阅文献^[22,23].

4 测试结果

山旺火山区玄武岩的斑晶(或晶屑)矿物内原生岩浆包裹体和共存基质玻璃中主量元素氧化物和火山挥发分 S, Cl, F 和 H₂O 含量的电子探针测试结果列于表 1. 火山岩斑晶(或晶屑)矿物内原生岩浆包裹体

是主矿物结晶过程中捕获周围熔浆迅速冷凝的产物,其挥发分含量是火山喷发前岩浆中挥发分成分的记录;与斑晶(或晶屑)矿物共存的基质玻璃的挥发分成分代表喷发后残留在岩浆内挥发分组成,这两项测试结果之差(即火山岩斑晶矿物中原生岩浆包裹体的挥发分含量和与其共存的基质玻璃的挥发分含量之差)是火山喷出挥发分气体的相对含量^[23]. 据此,我们利用表 1 中岩浆包裹体与基质玻璃的挥发分含量计算获得了山旺火山喷出气体含量(表 2). 为了便于比较,表 2 同时列出了公元 1783~1784 年冰岛Laki玄武质火山喷出的挥发分气体含量、中国辽西地区中生代粗面质火山喷出的挥发分气体含量和东北长白山火山历史时期碱流质火山喷出的挥发分气体含量^[8]. 本文的测试结果(表 1 和 2)表明: (1)山旺地区中新世玄武质火山喷出的S, Cl, F 和H₂O的含量分别为0.18~0.24, 0.03~0.05, 0.03~0.05 和 0.4~0.6 wt%¹⁾; (2)与导致大批生物(包括人)死亡的公元 1783~1784 年Laki火山活动相比^[4], 山旺中新世火山喷出气体S和Cl的含量较高, 但F和H₂O含量与Laki火山相当; (3)与喷出中酸性火山岩为主的中国辽西(其火山喷发导致了大规模生物集群死亡)和长白山火山^[8]相比, 山旺中新世火山喷出气体S的含量较高, 约高出一个数量级, 但其喷出的Cl, F和H₂O含量相对较低(表 2).

表 1 火山喷发物中斜长石斑晶内原生岩浆包裹体和共存的基质玻璃挥发分组分的电子探针分析结果(wt %)^{a)}

样号	岩性	测试对象	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	S	Cl	F	H ₂ O	总量
GUO-2	玄武岩	包裹体	46.75	2.34	13.10	11.37	0.15	9.67	11.12	2.31	1.59	0.26	0.285	0.062	0.075	0.92	99.082
GUO-2	玄武岩	包裹体	45.39	2.56	14.84	11.33	0.12	9.16	11.23	1.94	1.78	0.38	0.298	0.057	0.062	0.85	99.147
GUO-6	玄武岩	包裹体	47.58	2.40	14.36	10.89	0.14	8.79	10.86	2.47	1.20	0.41	0.223	0.043	0.069	0.57	99.435
GUO-6	玄武岩	包裹体	48.03	2.68	14.58	9.26	0.13	9.03	10.18	2.79	2.05	0.30	0.239	0.041	0.058	0.63	99.368
GUO-5	玄武岩	包裹体	47.54	2.59	13.88	10.73	0.16	10.07	9.73	2.10	1.85	0.21	0.251	0.058	0.072	0.76	99.241
GUO-5	玄武岩	包裹体	47.93	2.43	12.64	9.80	0.17	10.94	11.06	2.33	1.27	0.30	0.270	0.054	0.079	0.73	99.273
GUO-5	玄武岩	包裹体	48.02	2.19	13.77	10.92	0.14	8.74	10.04	2.69	1.93	0.44	0.264	0.060	0.060	0.74	99.264
GH-16	玄武岩	包裹体	49.17	1.89	15.67	8.70	0.11	8.50	9.57	2.78	2.04	0.48	0.260	0.067	0.078	0.69	99.315
GH-16	玄武岩	包裹体	48.83	2.17	14.49	9.69	0.13	8.67	10.01	2.53	1.89	0.47	0.266	0.051	0.067	0.74	99.264
GH-16	玄武岩	包裹体	48.06	2.20	14.18	10.41	0.12	9.05	10.29	2.32	1.94	0.26	0.271	0.059	0.063	0.78	99.223
GH-16	玄武岩	包裹体	49.46	1.96	15.30	9.35	0.13	8.62	9.04	2.64	1.88	0.55	0.252	0.065	0.051	0.70	99.298
GZ-7	火山灰	包裹体	45.87	2.71	13.63	10.96	0.14	11.38	10.30	2.13	1.26	0.31	0.287	0.061	0.088	0.87	99.126
GZ-7	火山灰	包裹体	46.31	2.39	13.85	11.09	0.15	10.76	9.37	2.29	1.91	0.51	0.301	0.059	0.083	0.93	99.073
GZ-7	火山灰	包裹体	48.11	2.23	14.47	9.97	0.12	8.83	10.12	2.65	1.83	0.39	0.296	0.066	0.076	0.84	99.158
GUO-2	玄武岩	基质	47.08	2.39	14.31	10.79	0.13	9.71	10.36	2.41	1.82	0.44	0.053	0.016	0.048	0.44	99.557
GUO-6	玄武岩	基质	48.52	2.31	14.59	10.47	0.14	8.69	10.22	2.48	1.92	0.40	0.041	0.013	0.031	0.18	99.825
GUO-5	玄武岩	基质	48.59	2.25	13.30	11.36	0.12	9.34	9.69	2.62	2.06	0.37	0.047	0.011	0.030	0.21	99.788
GH-16	玄武岩	基质	49.80	2.08	15.49	9.10	0.12	8.55	9.74	2.35	1.89	0.61	0.042	0.014	0.047	0.17	99.833
GZ-7	玄武岩	基质	47.34	2.36	13.57	11.53	0.13	9.82	9.67	2.61	2.07	0.48	0.051	0.012	0.038	0.32	99.681

a) 仪器: Cameca SX50. 测试单位: 德国Kiel大学. 测试者: 郭正府. 详细测试条件见正文. TFeO是全铁作为FeO的含量(wt %). 表中的“总量”一栏是指所列项目(水除外)含量之和(wt %). 表中所列H₂O的含量(wt %)是用“差异法”^[21]计算的结果

1) wt%为质量分数, 下同

表 2 山旺地区中新世玄武质火山喷出的气体成分(S, Cl, F 和 H₂O)和含量 (wt %)及其与其他火山喷出气体含量的对比

样号	岩性	S	Cl	F	H ₂ O
GUO-2	玄武岩	0.232	0.046	0.027	0.48
GUO-6	玄武岩	0.182	0.030	0.038	0.39
GUO-5	玄武岩	0.204	0.047	0.042	0.55
GH-16	玄武岩	0.218	0.053	0.031	0.52
GZ-7	火山灰	0.236	0.049	0.050	0.55
Laki ^{a)}	玄武岩	0.147	0.016	0.035	0.567
辽西 ^{b)}	粗面岩	0.029	0.081	0.059	1.743
长白山 ^{c)}	碱流岩	0.021	0.091	0.086	3.66

a) 公元 1783~1784 年冰岛Laki火山喷出的挥发分气体含量(据文献[4]). b) 中国辽西地区中生代粗面质火山喷出的挥发分气体含量(平均值)(据文献[8]). c) 中国东北长白山历史时期碱流质火山喷出的挥发分气体含量(平均值)(据文献[8]). 表中山旺地区数据为本区不同的火山岩样品(按表 1 中样号区分)对应的火山喷发所喷出的火山气体(包括S, Cl, F和H₂O)百分含量(wt %), 是由表 1 中每个火山岩样品(指同一样号)斑晶内岩浆包裹体挥发分的含量与对应的基质玻璃挥发分含量之差获得, 具体计算原理和详细计算过程见文献[23]

5 讨论

5.1 中小规模玄武质火山喷发柱高度及其对周围环境的影响

近期研究^[2]表明, 中小规模玄武质裂隙式岩浆喷发(受断裂控制的中心式和裂隙式火山喷发)可以对其周围地区的环境造成严重影响. 它们在喷发开始阶段形成熔岩喷泉(fire fountains), 在熔岩喷泉之上会形成火山对流柱(convective plume), 对流柱在上升过程中会将周围大气圈中大量不饱和状态的水蒸汽卷入柱中. 随着对流柱高度继续增加, 大气压会逐渐减小, 对流柱内水蒸汽会达到饱和状态. 此时对流柱达到的高度称为饱和高度(saturation height). 在饱和高度之上, 水蒸汽将冷凝形成液态微滴, 水凝结过程释放出的大量潜能作为饱和高度之上对流柱继续上升的推动力. 最终, 中小规模玄武质裂隙式火山喷发形成的对流柱高度可达到对流层顶或平流层底部. 火山喷发柱最大高度限定了火山活动对环境影响的时空范围^[1,2]. 火山喷发柱的高度越高(例如位于对流层顶或平流层内), 火山喷发物在大气圈中扩散的空间范围就越大, 它们在大气圈中滞留的时间也就越长, 导致火山活动对环境影响的时空范围越大; 反之, 如果火山喷发柱的高度较低(例如仅位于对流层的中下部), 那么火山喷发物扩散的空间范围就较小, 它们在大气圈中滞留的时间也就越短, 并且大量的火山气体会随着大气降水而降落于地表, 最终造成相应的火山活动对环境影响的时空范围较小、影响程度也较低^[1]. 因此, 评价火山喷发对环境是否造成严重影响的前提是要获得火山喷发柱最大高度的估算结果, 然后再考虑实验室测试的火山喷出气体的成分与含

量. 山旺中新世玄武质火山活动属于中小型裂隙式和受断裂控制的串珠状中心式火山喷发, 按照上述火山物理模型, 它喷出的火山气体可达到当时大气圈的对流层顶或平流层底部. 另外, 作者通过对山旺玛珥湖沉积物中火山灰的显微形态学观察和研究表明: 本区火山灰的粒度较小, 形态相近, 大小比较一致, 空间分布均匀, 但含量较低, 火山灰内的气孔含量较高, 气孔壁簿并且形态极其不规则, 火山灰在玛珥湖沉积物中几乎不存在印痕和划痕. 上述特征表明火山灰是通过较高的火山喷发柱进入大气圈后降落下来的. 因此, 我们认为, 山旺中新世玄武质火山活动形成的喷发柱较高, 其对环境影响的空间范围较大、时间跨度较长. 即, 山旺中新世玄武质火山喷发对当时环境影响较严重.

5.2 山旺中新世玄武质火山喷发对周围环境造成的影响及其与 Laki 火山活动的对比

目前研究山旺中新世火山活动必须解决的科学问题是: 山旺中新世玄武质火山喷发对当时环境影响的程度、方式和机理是什么. 其核心科学问题是山旺中新世火山活动是否能够引起对当时周围地区的生物非正常死亡或集群死亡级别的环境变化. 国外研究^[4~6]表明, 公元 1783~1784 年冰岛 Laki火山活动是世界上典型的、并且研究最多的中小型玄武质裂隙式喷发, 从火山喷发物成分、喷发方式、喷发规模、喷发物总量和喷发年代(都是新生代火山喷发)等方面, 它与山旺中新世火山喷发有可比性^[4,5,7~10]. Laki火山这次喷发形成的喷发柱最高达 13 km, 它对周围环境的破坏主要是由于火山喷出的大量氟化物气体最终导致当地羊群死于氟中毒. 据史料记载^[5,24], Laki火

山喷发杀死了冰岛上 75% 的牲畜, 使人口总量减少 24%。本文的实验室测试结果(表 2)显示, 山旺中新世火山喷出的氟化物气体和 H_2O 蒸汽含量与 Laki 火山相当, 但是其喷出的 S 和 Cl 的含量均高于 Laki 火山。即, 山旺火山活动除了类似于 Laki 火山喷出大量氟化物气体导致周围地区动物死于氟中毒外, 它还喷出了比 Laki 火山含量高的硫化物和氯化物混合气体。这种混合成分的火山气体对环境的危害比单一的硫化物或氯化物气体造成的危害要严重得多, 主要是因为它们在火山喷发柱中和进入大气圈后会发生光化学反应形成新的气体化合物, 因而对周围环境造成新的危害。国外研究^[1,24,25]表明, 火山喷出的硫化物和氯化物混合气体对周围生物生存环境的主要影响包括: (1) 喷出的大量具刺激性气味且有剧毒火山气体(例如, SO_2 , SO_3 , HCl , Cl_2 以及 HF 等剧毒气体), 它们会形成酸雨(例如, HCl 和 H_2SO_4), 导致陆地(包括湖泊中)动植物受到侵袭, 从而对生物的生存环境产生严重危害, 甚至造成大面积生物毁灭性死亡。(2) 火山喷出的大量卤化物和硫化物气体形成的混合气体组合可以在大气圈中形成火山气溶胶(例如, 火山喷出的二氧化硫气体, 在大气圈中受到紫外线照射, 发生下列光化学反应: $2\text{SO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{SO}_3$, $\text{SO}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$, 最终形成火山成因的 H_2SO_4 气溶胶), 它们会大幅度地吸收和散射太阳辐射, 使到达地面的太阳总辐射量显著减小, 最终会造成地表温度骤然下降, 甚至产生“火山冬天”效应, 从而对火山及其周围地区生物的生存环境产生严重危害。(3) 火山喷出的大量氯化物气体以及火山成因的气溶胶进入大气圈(甚至平流层)后, 会发生光化学反应(例如, $\text{HCl} + h\nu \rightarrow \text{H} + \text{Cl}$, $\text{Cl} + \text{O}_3 \rightarrow \text{ClO} + \text{O}_2$, $\text{ClO} + \text{O} \rightarrow \text{Cl} + \text{O}_2$, 等等), 加速大气圈中臭氧浓度降低, 最终造成大气圈 O_3 总量减少, 引起 O_3 层厚度减薄, 甚至破坏臭氧层而形成“臭氧洞”, 严重破坏生态平衡, 导致火山周围地区的动植物因接受过量紫外线辐射而大规模死亡。

上述研究表明: 由于山旺中新世火山喷出了比 Laki 火山含量高的硫化物与氯化物混合气体, 因此它比公元 1783~1784 年冰岛 Laki 火山喷发造成的环境灾害还要严重。以往研究^[4~6]表明: Laki 火山喷发曾经造成周围地区大批生物(包括人)死亡。那末, 中国山旺中新世火山喷发能够导致更大规模的生物死亡事件, 本区火山喷发除喷出大量氟化物气体导致周围

地区动物死于氟中毒外, 还喷出了以 S 和 Cl 及其化合物为主要成分的火山气体, 造成当时火山盆地内温度急剧下降和形成酸雨, 甚至火山喷出气体可达到对流层顶或平流层底部, 破坏臭氧层。山旺中新世火山活动的综合环境效应能够引起当时周围地区的生物非正常死亡或集群死亡级别的环境变化, 可以导致山旺火山盆地内生物大批死亡, 随后降落下来的大量火山灰快速覆盖了生物尸体, 另外加之水深壁陡玛珥湖的还原环境, 使山旺火山盆地内具有保存完好的中新世动植物化石, 并且数量大、种类多, 呈现出上述生物非正常死亡或集群死亡的特点。

应当指出, 本文的重点是从火山喷出气体成分和含量的角度初步探讨了山旺中新世玄武质火山喷发对当时环境造成的影响, 我们认为山旺火山活动能够造成周围地区的生物非正常死亡或集群死亡。然而对于山旺中新世火山喷发造成的明显环境变化是否有化石纪录以及该纪录是否完全保存下来, 尚需进一步研究。尽管山旺化石赋存的页岩内含有丰富的、本文所研究的火山喷发形成的火山灰, 但是目前所见的山旺化石是否可以代表生物非正常死亡或集群死亡事件, 也需要进一步证实。

6 结论

山旺中新世玄武质火山活动属于中小型裂隙式和受断裂控制的串珠状中心式火山喷发, 它喷出了高含量的火山气体(S, Cl, F 和 H_2O)进入当时的大气圈, 其主要的环境效应是造成火山区及其附近地区动物死于氟中毒、引起地表温度下降、形成酸雨和破坏臭氧层, 能够造成周围地区的生物非正常死亡或集群死亡。

致谢 野外考察期间曾经得到山东省临朐县李俊德先生的大力支持与帮助, 参加野外考察的还有刘强、隋建立和倪云燕博士, 作者曾与 M. Wilson 教授、H. U. Schmincke 教授和毛骞博士进行过有益的讨论, 狄永军博士在研究中给予了许多帮助, 三位匿名审稿专家提出了许多重要修改建议, 在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Schmincke H U. Volcanism. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 1—325
- 2 Wingnall P B. Large igneous provinces and mass extinctions. Earth-Sci Rev, 2001, 53: 1—33[DOI]
- 3 Sharma K, Blake S, Self S, et al. SO_2 emissions from basaltic

- eruptions, and the excess sulfur issue. *Geophys Res Lett*, 2004, 31: L13612, doi:10.1029/2004GL019688
- 4 Thordarson T, Self S, Óskarsson N, et al. Sulfur, chlorine, and fluorine degassing and atmospheric loading by the 1783-1784 AD Laki (Skaftár Fires) eruption in Iceland. *Bull Volcanol*, 1996, 58(2-3): 205—225[DOI]
- 5 Firth C R, McGuire W J. *Volcanoes in the Quaternary*. London: Geological Society of London, 1999. 1—232
- 6 Passmore E, MacLennan J, Fitton G. Quantifying geochemical variation in basalt from Laki, southeast Iceland. In: Wilson M, ed. 40th anniversary meeting of VMSG. London: Kluwer Academic Publishers, 2006. 66—67
- 7 刘嘉麒. 中国火山. 北京: 科学出版社, 1999. 1—219
- 8 郭正府, 刘嘉麒, 汪筱林. 辽西中生代火山喷发对古气候和古脊椎动物生存环境的影响. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2003, 33(1): 59—71
- 9 陈道公, 彭子成. 山东新生代火山岩 K-Ar 年龄和 Pb-Sr 同位素特征. *地球化学*, 1985, (4): 293—303
- 10 陈道公, 李彬贤, 张巽, 等. 山东新生代火山岩微量元素地球化学. *地球化学*, 1988, 2: 234—247
- 11 Zhi X C, Song Y, Frey F A, et al. Geochemistry of Hannuoba basalts, Eastern China: constraints on the origin of continental alkaline and tholeiitic basalt. *Chem Geol*, 1990, 88: 1—33[DOI]
- 12 樊祺诚, 刘若新. 中国东部新生代玄武岩稀土元素地球化学. 见: 刘若新, 主编. 中国新生代火山岩年代学与地球化学. 北京: 地震出版社出版, 1992. 1—427
- 13 罗照华, 李凤麟, 杨慕华. 山旺盆地的成因及其地质意义. *现代地质*, 1992, 6(1): 30—38
- 14 Zou H B, Zindler A, Xu X S, et al. Major, trace element, and Nd, Sr, Pb isotope studies of Cenozoic basalts in SE China: mantle sources, regional variations and tectonic significance. *Chem Geol*, 2000, 171: 33—47[DOI]
- 15 Deng J F, Mo X X, Zhao H L, et al. A new model for the dynamic evolution of Chinese lithosphere: “continental roots-plume tectonics”. *Earth-Sci Rev*, 2004, 65: 223—275[DOI]
- 16 Niu Y L. Generation and evolution of basaltic magmas: some basic concepts and a new view on the origin of Mesozoic-Cenozoic basaltic volcanism in Eastern China. *Geol J China Univ*, 2005, 11(1): 9—46
- 17 金隆裕. 郯庐断裂带中段新生代火山岩的 K-Ar 年龄值和分期. *地质论评*, 1985, 31(4): 309—315
- 18 李凤麟. 山东临朐山旺组的再认识. *地层学杂志*, 1991, 15(2): 123—129
- 19 王继广, 司竹君. 山东山旺化石宝库. *山东地质*, 2002, 18(6): 47—48
- 20 陈平富, 阎际兴, 王琴. 山东山旺中新世鱼化石埋藏学及古湖泊环境. *植物学通报*, 2000, 17(专辑): 264—271
- 21 郭正府, 刘嘉麒, 隋淑珍, 等. 白头山火山公元 1199/1200 年喷发的火山气体总量估算及其意义. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2001, 31(8): 668—675
- 22 Horn S, Schmincke H U. Volatile emission during the eruption of Baitoushan Volcano (China/North Korea) ca. 969 AD. *Bull Volcanol*, 2000, 61: 537—555
- 23 郭正府, 刘嘉麒, 汉景泰, 等. 长白山天池火山气体对环境的影响及潜在火山灾害研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35 (8): 781—789
- 24 Sigurdsson H. *Encyclopedia of Volcanoes*. New York: Academic Press, 2000. 1—1384
- 25 Oppenheimer C, Pyle D M, Barclay J. *Volcanic Degassing*. London: Geological Society of London, 2003. 1—347