

doi:10.3799/dqkx.2016.007

火山灰全岩与原位分析差异:以四海龙湾记录的 1600 年前金龙顶子火山喷发为例

孙春青^{1,2}, 游海涛^{2,3}, 刘嘉麒^{1*}, 储国强¹, 刘 强¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所新生代地质与环境研究室, 北京 100029

2. 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

3. 中国科学院大学计算地球动力学重点实验室, 北京 100049

摘要: 火山灰地层学主要依靠火山玻璃的成分进行源区的识别, 然而, 当火山玻璃成分不均一时就会对源区识别造成影响。四海龙湾玛珥湖位于东北新生代龙岗火山区内, 其湖泊沉积物可以记录周边的火山喷发, 电子探针等方法得到的火山玻璃成分可以揭示其喷发来源。同时, 玛珥湖的纹层年龄可以限定其喷发年龄。在四海龙湾沉积物(钻孔 2008)的 78~79 cm 岩芯处出现一层火山灰层, 其纹层年龄为 AD 308 a, 电子探针结果显示火山玻璃具有不均一的主量元素组成, 为玄武质粗安岩到碱玄质响岩。FeO、TiO₂ 及 Al₂O₃ 等与 MgO 协变图解更清楚地显示了此次火山喷发的火山玻璃成分的不均一性。火山玻璃与火山灰全岩对比分析显示, 全岩分析在火山灰地层学应用中容易造成对比偏差。

关键词: 四海龙湾; 火山灰; 火山玻璃; 火山灰地层学; 金龙顶子; 岩石学。

中图分类号: P585

文章编号: 1000-2383(2016)01-0097-08

收稿日期: 2015-07-02

Differences between Whole Rock and Insitu Analysis on Tephra: Evidence from the 1600 a cal. BP Eruption of Jinlongdingzi Volcano

Sun Chunqing^{1,2}, You Haitao³, Liu Jiaqi^{1*}, Chu Guoqiang¹, Liu Qiang¹

1. Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. Department of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Laboratory of Computational Geodynamics of Chinese Academy of Sciences, College of Earth Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Tephra layers with unknown ages are usually identified and fingerprinted by their glass compositions. But, such correlations may be problematic when they own heterogeneous glass compositions. Lake Sihailongwan locates in the Longgang volcanic field and its varved lacustrine sediments can preserve the volcanic products from surrounding areas. Additionally, its varve-chronology can provide an advantage chronological framework for recent geological events which are difficult to date by other dating methods. A core drilled from Lake Sihailongwan (core 2008) shows that there is a tephra layer at 78–79 cm and an age of AD 308 was assigned to it by varve-chronology. The volcanic glass exhibits a heterogeneous composition, ranging from basaltic trachyandesite to tephriphonolite. Such a heterogeneous characteristic of glass shards from this tephra layer can be clearly revealed by the biplots of FeO, TiO₂ and Al₂O₃ vs. MgO. For the applications to the tephrostratigraphy, whole rock analysis of tephra may be wrong and could not reflect the heterogeneity of primary magma while composition of glass is a better choice.

Key words: lake Sihailongwan; tephra; volcanic glass; tephrochronology; Jinlongdingzi; petrology.

基金项目: 国家自然科学基金委重大国际合作研究项目(No.41320104006); 国家自然科学基金面上项目(Nos.41272369, 41472320).

作者简介: 孙春青(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事火山灰年代学的学习和研究. E-mail: suncq@mail.iggcas.ac.cn

*** 通讯作者:** 刘嘉麒, E-mail: liujq@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 孙春青, 游海涛, 刘嘉麒, 等, 2016. 火山灰全岩与原位分析差异: 以四海龙湾记录的 1600 年前金龙顶子火山喷发为例. 地球科学, 41(1): 97–104.

大规模火山喷发产生的火山灰短时间内可以在大范围内进行沉降,具有空间范围内的等时性和广泛性,它的等时特征优势为第四纪科学研究提供了高分辨率的时间标尺,可以用来综合对比以及对某些地质事件进行定年,因此,火山灰地层学在第四纪科学研究中起到了越来越重要的作用(Lowe, 2011).同时,火山灰层序的地球化学研究可以用来指示源区火山的喷发特征、岩浆成因以及火山灾害预测等(Shane, 2000; Shane and Hoverd, 2002; Tomlinson *et al.*, 2012a).

在对火山灰地层进行识别之前,其层序特征需要明确,即年龄决定了火山灰层的对比.火山灰的识别具有很多方式,主要是通过火山灰的矿物组成、单颗粒的火山玻璃成分、矿物成分等,其中单颗粒的火山玻璃成分应用最为广泛(Shane, 1998; Shane *et al.*, 2003; 郭正府等, 2005; Shane *et al.*, 2008; Smith *et al.*, 2011; Matsu'ura *et al.*, 2012; 赵宏丽和刘嘉麒, 2012).然而,有的火山喷发会产生一些难以区分的火山玻璃,例如公元 74 ka 的 Toba 火山喷发,很难用火山玻璃的成分将最年轻的 Toba 火山灰(Youngest Toba Tuff: YTT)和最老的 Toba 火山灰(Oldest Toba Tuff: OTT)的火山产物分离开来(梁细荣等, 2001; 郭正府等, 2002; Lee *et al.*, 2004; Gatti *et al.*, 2014).因此,只有通过特征性的火山玻璃或者矿物组成才可以确定地将某些火山灰分离开来,如连续的成分的特征性变化,及微量元素、同位素特征(Pearce *et al.*, 2004; Giaccio *et al.*, 2013; Sun *et al.*, 2014).通过全岩的火山灰成分更难进行火山灰的识别,主要是由于随着离火山口距离增大,分选作用使得重矿物及斑晶等颗粒首先沉降,而相对较轻的火山玻璃等会运移更远,因此造成了区域上火山灰全岩成分的不一致性;另外,近源火山灰中会混有岩屑等非原始岩浆的成分,这也会对全岩成分造成影响.

通过对炭化木以及泥炭沉积物的研究,此次龙岗火山喷发的时间被限定为 $1\ 500 \pm 70$ a B.P. 和 $1\ 740 \pm 75$ a B.P.(樊祺诚等, 2002).小龙湾纹层纪年的研究显示,此次火山喷发的时间为 AD 460 年(Liu *et al.*, 2009),全岩的火山灰成分以及喷发记录显示,此次火山灰与龙岗地区的 T1 火山灰层是相对应的.本文对四海龙湾岩芯(图 1)研究显示,此次火山喷发的时间大约为 AD 308 年,同时,首次对火山灰中的玻璃进行了原位测试,显示此层火山灰的玻璃具有不均一的成分特征.

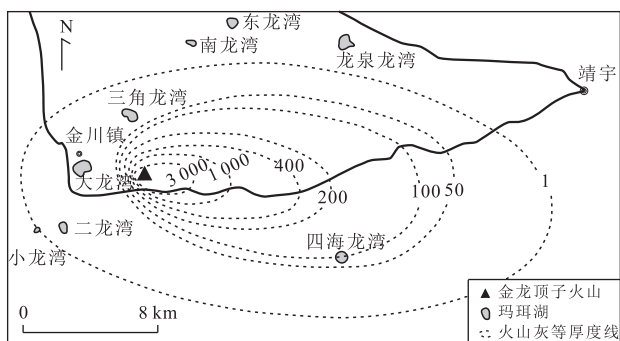


图 1 龙岗火山区玛珥湖分布以及金龙顶子火山灰分布
Fig.1 Map of maar lakes in the Longgang volcanic filed and the distribution of the Jinlongdingzi tephra
等厚度曲线单位: mm; 根据 Liu *et al.* (2009) 修改

1 实验材料与方法

1.1 火山灰分离与提取及测试分析

对钻孔进行 1 cm 的间隔分样,由于湖泊沉积物中含有大量的有机质及碳酸盐岩等杂质,因此,样品首先用 10% 的稀盐酸浸泡 12 h,用以去除火山灰中的可溶性碳酸盐岩等无机盐.然后加入 30% 的 H_2O_2 试剂,并且在电热板上加热,直至除去所有的有机质.处理过后的样品用 50 μm 和 100 μm 的筛网进行过滤,再在双目镜下挑选出纯净的火山玻璃,进行制靶以备电子探针分析(EPMA).火山玻璃主量元素在中国科学院地质与地球物理研究所岩石圈国家重点实验室的 JEOL JXA 8100 电子探针上执行,分析了 Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Fe、Ti、Mn、Cl 等 10 个元素,电压为 15 kV,电流为 6 nA,束斑大小为 10 μm .

1.2 纹层年代学

从钻孔中取得的条状物为扰动沉积物,对其进行速冻然后真空干燥,进而用环氧树脂进行注胶,再制备薄片.在显微镜下进行纹层的鉴定和查数,纹层得到的年龄与其他独立绝对定年方式进行相互验证,例如 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 和 ^{14}C 定年结果(Mingram *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2005; Chu *et al.*, 2008; Sun *et al.*, 2015),这样使得得到的记录更加可靠.

2 结果

在钻孔沉积物中的 78~79 cm 处提取了大量纯净的火山玻璃颗粒,具有明显的火山玻璃特征(图 2),火山玻璃构成了此层火山灰的主要成分,同

表 1 四海龙湾中记录的此次喷发的火山灰的电子探针测试结果 (%)

Table 1 WDS-EPMA results of glass shards from Lake Sihailongwan for this eruption

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	分析总量
52.74	2.35	17.53	9.55	0.20	2.71	5.76	5.19	3.89	0.11	98.26
53.63	2.28	17.11	9.05	0.11	2.59	4.67	5.88	4.59	0.13	98.39
50.18	3.15	17.16	10.69	0.18	3.57	7.29	4.54	3.16	0.08	97.41
50.54	2.68	19.06	9.33	0.14	2.99	7.88	4.53	2.77	0.10	98.11
52.86	2.18	17.75	9.89	0.21	2.82	5.52	4.93	3.69	0.18	97.11
53.26	2.25	17.49	9.27	0.18	2.59	5.35	5.16	4.32	0.17	97.52
52.15	2.34	17.62	9.89	0.21	2.99	6.09	4.96	3.67	0.12	98.16
51.78	2.43	17.65	9.87	0.15	3.18	4.79	5.41	4.65	0.12	96.65
49.67	3.05	17.39	10.69	0.14	3.72	7.57	4.68	3.03	0.07	97.85
51.98	2.41	17.78	9.84	0.22	3.17	6.22	4.97	3.35	0.10	96.22
51.17	2.44	17.79	9.95	0.22	3.61	6.65	4.88	3.19	0.14	97.67
52.19	2.36	17.96	9.78	0.21	2.97	5.74	5.25	3.44	0.11	98.50
52.91	2.11	18.03	9.44	0.18	2.92	5.37	5.29	3.63	0.15	97.37
53.06	1.46	22.64	5.73	0.13	1.63	7.89	5.08	2.32	0.07	96.31
52.76	1.55	20.65	7.25	0.07	1.98	6.42	5.76	3.48	0.10	97.68

注:所有的火山玻璃已经进行无水化处理,总量值为原始分析值。

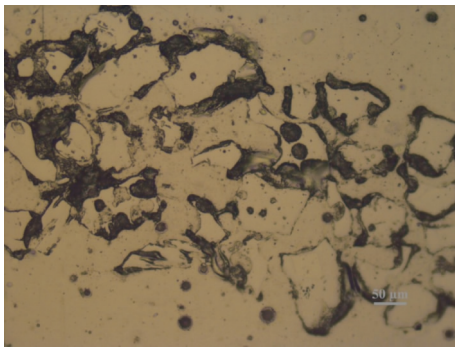


图 2 此次喷发的火山玻璃反射光照片

Fig.2 Photograph of the glass shards from this tephra layer in Lake Sihailongwan

时还有斜长石等晶屑出现。纹层纪年结果显示此层火山灰的年龄为 AD 308 年,与千年大喷发的火山灰层距离为 25 cm,51 cm 处树叶的¹⁴C 定年结果为 1 010~930 cal a B.P.(Sun *et al.*,2015),因此,本研究中的定年结果与前人的定年结果相一致。

火山玻璃主量元素结果显示原始总量均大于 96%,因此,没有经过明显的后期脱硅及水化等作用。由于在湖泊等水体环境中,火山玻璃很容易受到水体等环境的影响,水可以被火山玻璃吸收(Pearce *et al.*,2014),所以,在火山灰对比时要将所有的数据进行无水化处理,尽量排除外因的干扰。TAS 图和主要的 Harker 图解显示,此次火山喷发的火山灰具有不均一的主量元素特征,TiO₂、Al₂O₃、FeO 及 MgO 含量可以明显地区分出它们的不均一性(图 3 和图 4)。火山玻璃显示出的主量元素特征与全

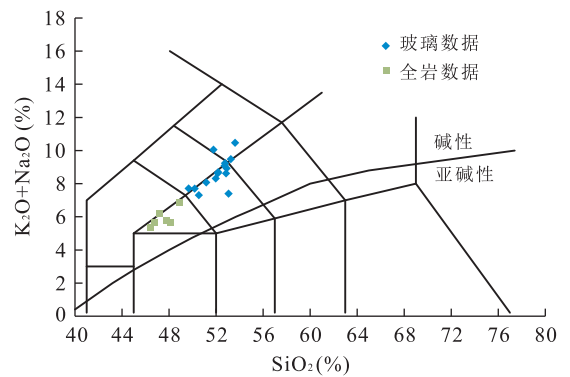


图 3 四海龙湾沉积物中火山灰 TAS 图

Fig.3 TAS diagram of the glass shards from Lake Sihailongwan. 蓝色菱形为本文的玻璃屑数据,绿色矩形为已经发表的全岩火山灰数据;据 Liu *et al.*(2009)和樊祺诚等(1999)

岩得到的结果有着明显的差别,全岩分析没有显示出喷发时刻岩浆成分的不均一性(图 3 和图 4)。

3 讨论

3.1 水环境对火山玻璃的影响

火山灰的对比识别很大程度是依赖于玻屑的地球化学组成的,成分的精准性决定了源区识别的成功与否,因此,在火山灰年代学应用中,火山灰从火山喷发、降落、沉积直至后续人工分析的整个过程,应至少受到自然及实验室等过程的影响(Davies *et al.*,2002;Blockley *et al.*,2005)。火山玻璃一旦沉积到水体环境中火山玻璃就与水体、有机质、细菌等进行接触和反应,而且火山玻璃的表面积与体积比

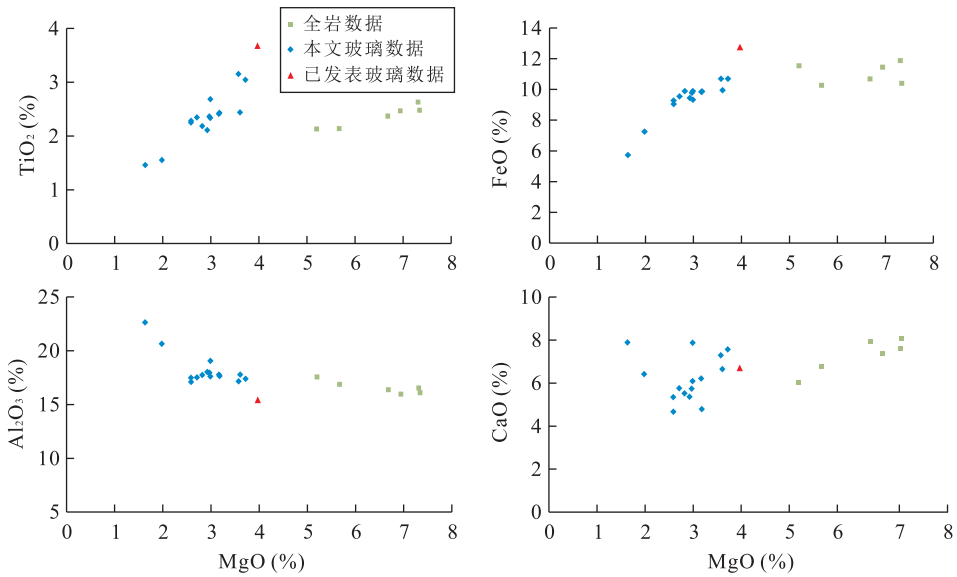


图 4 四海龙湾沉积物中记录的火山灰玻屑、此次喷发野外记录全岩及其他地区的火山玻璃的 Harker 图

Fig.4 Harker diagrams for the glass shards from this tephra layer (blue rhombus) and the other published glass (red triangle) and whole rock data (green rectangle)

蓝色菱形为本文的玻屑数据,绿色矩形为已经发表的全岩火山灰数据,红色三角形为已发表玻屑数据

值越大,这样的反应会更加明显,脱硅及水化作用常常导致火山玻璃成分的变化(Blockley *et al.*, 2005, 文中图 1 所示).

四海龙湾沉积物中同样也面临着水体、细菌等环境的影响,四海龙湾中所有火山玻璃的总量测试结果均在 96% 以上(表 1),欧洲等湖泊及海洋等沉积物中的火山玻璃总量在 90% 以上,通过无水化处理即可用于火山灰地层学应用研究(Pearce *et al.*, 2014),因此,本文原位火山玻璃主量元素结果具有一定的可应用性.同时由于此次火山灰的成分偏基性,且气孔不发育,表面积与体积比值相对较小(图 2),而且电子探针测试前火山玻璃表层已经被剖平,所以,水体等外部环境的影响可忽略.

3.2 全岩与火山玻璃成分

由主量元素图解我们可以得出,火山玻璃的成分与全岩的成分相差较大(图 3 和图 4),主要原因有:首先,全岩的成分代表了包括岩屑、玻屑以及晶屑所有的火山灰平均组成,而且随着火山灰的飘移,火山灰在组成上出现了成分上的分异,因此可能造成不同位置上的成分差异;第二,火山灰包含有岩屑、玻屑及晶屑,全岩分析代表了它们的平均值,因此,全岩分析不能反映喷发时刻的岩浆成分的均一与否;第三,在全岩分析时常有晶屑和岩屑的混入,因此,如果喷发时刻的岩浆成分均一的话,晶屑及岩屑的不同比例及不同种类的混入,很可能造成岩浆

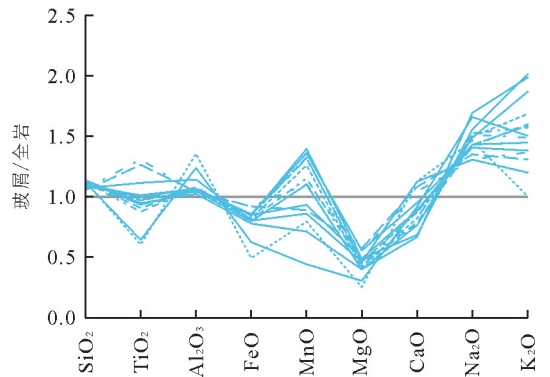


图 5 四海龙湾沉积物中火山灰玻屑归一化到全岩的对比
Fig.5 Diagram of the glass data normalised to the whole rock composition of the tephra recorded in the Lake Sihailongwan

全岩数据根据 Liu *et al.* (2009)

成分的多样性;第四,对于同一个岩浆房喷发出的火山灰,其火山玻璃成分明显受控于结晶分异等过程,因此,火山玻璃的成分可以很有效地识别出不同喷发阶段(Shane *et al.*, 2008; Kuehn *et al.*, 2011; Lowe, 2011; Tomlinson *et al.*, 2012b).

全岩数据显示此次火山喷发的火山灰成分主要是粗面玄武质,然而火山玻璃显示其成分为玄武质粗安岩到碱玄武质响岩(图 3).通过火山玻璃与全岩的对比图解(图 5)可以得到,两种分析方法导致元素变化最大的是 Ti、Fe、Mg、Na、K 等元素,这些元

素的变化可能与橄榄石、铁钛氧化物及斜长石等分离结晶作用有关。由于龙岗地区岩浆的水热喷发上升速度较快,因此,龙岗火山区的火山碎屑岩中经常有地幔包体的出现(Xu *et al.*, 2003),野外对此次喷发的火山渣剖面也可以见到二辉橄榄岩等包体颗粒出现(刘祥和张成梁, 1997; 樊祺诚等, 1999),这些地幔包体如果在全岩分析时混入,也会对全岩和火山玻璃成分差异造成影响。另外,由于一些湖泊记录很少有足够量的火山灰用于进行常规的主微量元素的分析使用,即使像 INAA 及 XRF 等方法可以用于指示火山灰的层位等信息(Lim *et al.*, 2008; Kyllander *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2014),但是它们得到的结果是不能代表喷发时刻岩浆的成分的,不能用于准确的源区识别。

火山玻璃是在岩浆快速冷却过程中形成的,因此它代表了喷发时刻的岩浆的整体成分,同时结晶分异等过程明显地控制着玻璃的成分,因此,火山玻璃是在火山灰地层学对比应用中最适合的备选材料(Davies *et al.*, 2002; Kuehn *et al.*, 2011)。Ti⁴⁺、Fe³⁺ 及 Al³⁺ 等元素由于在低温环境下不溶解于水质流体,他们在后期外界环境中显示为不易迁移元素,因此,这些元素可以很好地保留并指示岩浆成分及其分异过程(Gatti *et al.*, 2014)。元素比值在 Al₂O₃/TiO₂-FeO/TiO₂ 及 TiO₂/Al₂O₃-FeO/Al₂O₃ 等图解得出(图 6),比值测试值在二次标样的 3σ(99%的可能性)范围内是非常不一致的,因此,表明喷发时刻的岩浆具有明显的不均一的 Ti、Fe 及 Al 的含量,或者代表了不同喷发阶段的产物。

综合全岩和火山玻璃的分析结果可以得出,火山灰的全岩分析掩盖了此次火山喷发的岩浆过程的不均一性,或者不能反映出喷发过程的阶段性,因此,在火山灰地层学的成分对比分析中,应该尽量选

择原位的主、微量元素(EPMA 和 LA-ICP-MS)测试以充分反映岩浆的成分特征及喷发期次问题。

3.3 此次火山喷发火山灰对比分析

如果一层火山灰具有明显的地球化学特征,那么它就可以在区域内进行广泛的关联和对比,从而实现了火山灰地层学的概念;如果,这层火山灰的精确年龄也能够得到,那么这层火山灰就可以为其出现的环境进行年龄框架的限定,因此,实现了火山灰年代学的概念(Davies *et al.*, 2002; Lowe, 2011)。中国东北地区分布有大量的玛珥湖(如四海龙湾、二龙湾等)以及泥炭(如哈尼泥炭)等沉积环境,为保存火山喷发记录以及气候环境指标提供了有效载体,此次金龙顶子的火山喷发产生的火山灰在龙岗地区分布广泛,具有重要的火山灰地层学应用意义,因此,对其地球化学特征的充分识别是至关重要的(刘祥和张成梁, 1997; 樊祺诚等, 1999; Mingram *et al.*, 2004; Liu *et al.*, 2009)。

龙岗火山区主要是以基性玄武质火山喷发为主,周边的长白山等地近代主要是以大规模碱流质火山喷发为主,考虑到四海龙湾中火山灰记录的厚度(大约 8 cm),此次火山喷发不是由更北边的五大连池、镜泊湖等地的火山喷发产生,应该是由本地的火山喷发,即为近代的 1 600 年前的金龙顶子火山喷发(樊祺诚等, 1999; 樊祺诚等, 2002)。金川西大甸子干玛珥发育全新世草本泥炭,一层玄武质的火山渣层在大约 250 cm 深处的沉积物中发现,其年龄为 2 002~1 976 a. B.P., 并与金龙顶子 1 600 年前的此次喷发相对应(毛绪美 *et al.*, 2002; Cheng *et al.*, 2008; Mao *et al.*, 2009; 黄庭, 2013),电子探针数据显示其岩性为玄武岩(图 3 和图 4),与笔者的结果有一定差异,但是全岩的微量元素测试结果显示,它与四海龙湾的火山灰记录有着相似的稀土配分曲线

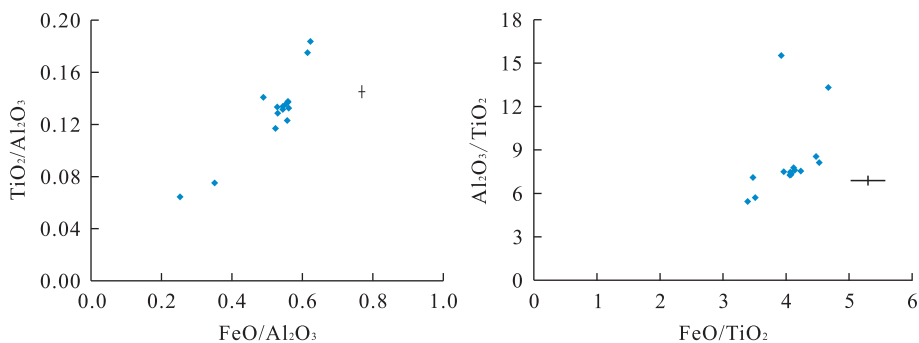


图 6 四海龙湾火山灰中玻璃的不易迁移元素的比值

Fig.6 Immobile elements ratios of the glass from this eruption recorded in the Lake Sihailongwan

(Liu *et al.*, 2009).

玛珥湖具有明显纹层纪年应用,其年龄可以为其他一些近代难以定年的地质事件提供有效的时间框架(Mingram *et al.*, 2004; Chu *et al.*, 2005; Ojala *et al.*, 2012),然而,我们新的玛珥湖的定年结果和以往的玛珥湖纹层年龄结果与西大甸子等泥炭中¹⁴C的定年结果有着较大的差异.所以,此层火山灰即使没有达到火山灰年代学的应用效果,却具有火山灰地层学的应用意义,是一个广泛空间区域内的标志层.

4 结论

(1)四海龙湾沉积物记录了 1 600 年前龙岗火山区的一次大规模火山喷发,纹层纪年显示此次火山喷发的时间大约为 AD 308 年,与前人常规的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、¹⁴C 等定年结果相一致.

(2)此次火山喷发产生的火山灰具有不一致的火山玻璃成分.

(3)在火山灰地层学中的对比分析应用中,火山灰全岩分析与火山玻璃原位分析相比具有一定的应用局限性,主要是全岩分析不能反映喷发时的岩浆成分特征,同时,全岩成分很容易混有其他外来物质,造成火山灰对比的不确定性.

References

- Blockley, S. P. E., Pyne-O'Donnell, S. D. F., Lowe, J. J., et al., 2005. A New and Less Destructive Laboratory Procedure for the Physical Separation of Distal Glass Tephra Shards from Sediments. *Quaternary Science Reviews*, 24 (16–17): 1952–1960. doi: 10.1016/j.quascirev.2004.12.008
- Cheng, S., Mao, X., Wang, F., et al., 2008. Tephra Discovered in High Resolution Peat Sediment and Its Indication to Climatic Event. *Journal of China University of Geosciences*, 19(2): 174–183. doi: 10.1016/s1002-0705(08)60036-9
- Chu, G., Liu, J., Schettler, G., et al., 2005. Sediment Fluxes and Varve Formation in Sihailongwan, A Maar Lake from Northeastern China. *Journal of Paleolimnology*, 34(3): 311–324. doi: 10.1007/s10933-005-4694-0
- Chu, G., Sun, Q., Rioual, P., et al., 2008. Dinocyst Microlaminations and Freshwater “Red Tides” Recorded in Lake Xiaolongwan, Northeastern China. *Journal of Paleolimnology*, 39(3): 319–333. doi: 10.1007/s10933-007-9106-1
- Davies, S. M., Branch, N. P., Lowe, J. J., et al., 2002. Towards a European Tephrochronological Framework for Termination and the Early Holocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 360 (1793): 767–802. doi: 10.1098/rsta.2001.0964
- Fan, Q. C., Liu, R. X., Wei, H. Q., et al., 1999. The Petrology and Geochemistry of Jinlongdingzi Modern Active Volcano in Longgang Area. *Acta Petrologica Sinica*, 15 (4): 584–589 (in Chinese with English abstract).
- Fan, Q. C., Sui, J. L., Liu, R. X., et al., 2002. Periods of Quaternary Volcanic Activity in Longgang Area, Jilin Province. *Acta Petrologica Sinica*, 18(4): 495–500 (in Chinese with English abstract).
- Gatti, E., Villa, I. M., Achyuthan, H., et al., 2014. Geochemical Variability in Distal and Proximal Glass from the Youngest Toba Tuff Eruption. *Bulletin of Volcanology*, 76(9): 1–16. doi: 10.1007/s00445-014-0859-x
- Giaccio, B., Arienzo, I., Sottili, G., et al., 2013. Isotopic (Sr-Nd) and Major Element Fingerprinting of Distal Tephra: An Application to the Middle-Late Pleistocene Markers from the Colli Albani Volcano, Central Italy. *Quaternary Science Reviews*, 67: 190–206. doi: 10.1016/j.quascirev.2013.01.028
- Guo, Z. F., Liu, J. Q., Chu, G. Q., et al., 2002. Composition and Origin of Tephra of the Huguangyan Maar Lake. *Quaternary Sciences*, 22(3): 266–272 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. F., Liu, J. Q., Fan, Q. C., et al., 2005. Source of Volcanic Ash in the Sediments of Sihailongwan Maar, NE China, and Its Significance. *Acta Petrologica Sinica*, 21 (1): 251–255 (in Chinese with English abstract).
- Huang, T., 2013. Peatland Archives of Holocene Volcanic Eruption Response to Paleoclimate in Northeast China (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Kuehn, S. C., Froese, D. G., Shane, P. A. R., 2011. The INTAV Intercomparison of Electron-Beam Microanalysis of Glass by Tephrochronology Laboratories: Results and Recommendations. *Quaternary International*, 246(1–2): 19–47. doi: 10.1016/j.quaint.2011.08.022
- Kylander, M. E., Ampel, L., Wohlfarth, B., et al., 2011. High-Resolution X-Ray Fluorescence Core Scanning Analysis of Les Echets (France) Sedimentary Sequence: New Insights from Chemical Proxies. *Journal of Quaternary Science*, 26(1): 109–117. doi: 10.1002/jqs.1438
- Lee, M. Y., Chen, C. H., Wei, K. Y., et al., 2004. First Toba

- Supereruption Revival. *Geology*, 32(1): 61. doi: 10.1130/g19903.1
- Liang, X. R., Wei, G. J., Shao, L., et al., 2001. Records of Toba Eruption in the Sediments from South China Sea—Evidence from the Volcanic Glass Recorded in the ODP 1143. *Science in China (Series D)*, 31(10): 861—866 (in Chinese).
- Lim, C., Ikehara, K., Toyoda, K., 2008. Cryptotephra Detection Using High-Resolution Trace-Element Analysis of Holocene Marine Sediments, Southwest Japan. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(20): 5022—5036. doi: 10.1016/j.gca.2008.07.021
- Lim, C., Kim, S., Lee, C., 2014. Geochemical Fingerprint of the Primary Magma Composition in the Marine Tephra Originated from the Baegdusan and Ulleung Volcanoes. *Journal of Asian Earth Sciences*, 95(1): 266—273. doi: org/10.1016/j.jseaes.2014.08.012
- Liu, J. Q., Chu, G. Q., Han, J. T., et al., 2009. Volcanic Eruptions in the Longgang Volcanic Field, Northeastern China, during the Past 15 000 Years. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(5): 645—654. doi: 10.1016/j.jseaes.2008.09.005
- Liu, X., Zhang, C. L., 1997. Sihai Basaltic Scoria Deposits in the Longgang Volcanic Swarm belong to the Subplinian Eruption of Jinlongdingzi Volcano. *Jilin Geology*, 16(3): 1—8 (in Chinese with English abstract).
- Lowe, D. J., 2011. Tephrochronology and Its Application: A Review. *Quaternary Geochronology*, 6(2): 107—153. doi: 10.1016/j.quageo.2010.08.003
- Mao, X., Cheng, S., Hong, Y., et al., 2009. The Influence of Volcanism on Paleoclimate in the Northeast of China: Insights from Jinchuan Peat, Jilin Province, China. *Chinese Journal of Geochemistry*, 28(2): 212—219. doi: 10.1007/s11631-009-0212-9
- Mao, X. M., Hong, Y. T., Zhu, Y. X., et al., 2002. Discovery of Volcanic Explosion-Derived Materials in Jinchuan Peat and Its Significance. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(1): 9—14 (in Chinese with English abstract).
- Matsu'ura, T., Furusawa, A., Yanagida, M., 2012. Detection and Correlation of Widespread Cryptotephra in Middle Pleistocene Loess in NE Japan Using Cummingtonite Geochemistry. *Journal of Asian Earth Sciences*, 60: 49—67. doi: 10.1016/j.jseaes.2012.07.022
- Mingram, J., Allen, J. R. M., Brüchmann, C., et al., 2004. Maar- and Crater Lakes of the Long Gang Volcanic Field (N. E. China)—Overview, Laminated Sediments, and Vegetation History of the Last 900 Years. *Quaternary International*, 123—125: 135—147. doi: 10.1016/j.quaint.2004.02.014
- Ojala, A. E. K., Francus, P., Zolitschka, B., et al., 2012. Characteristics of Sedimentary Varve Chronologies—A Review. *Quaternary Science Reviews*, 43: 45—60. doi: 10.1016/j.quascirev.2012.04.006
- Pearce, N. J. G., Abbott, P. M., Martin-Jones, C., 2014. Microbeam Methods for the Analysis of Glass in Fine-Grained Tephra Deposits; A SMART Perspective on Current and Future Trends. *Geological Society, London, Special Publications*, 398. doi: 10.1144/sp398.1
- Pearce, N. J. G., Westgate, J. A., Perkins, W. T., et al., 2004. The Application of ICP-MS Methods to Tephrochronological Problems. *Applied Geochemistry*, 19(3): 289—322. doi: 10.1016/s0883-2927(03)00153-7
- Shane, P., 1998. Correlation of Rhyolitic Pyroclastic Eruptive Units from the Taupo Volcanic Zone by Fe-Ti Oxide Compositional Data. *Bulletin of Volcanology*, 60(3): 224—238. doi: 10.1007/s004450050229
- Shane, P., 2000. Tephrochronology: A New Zealand Case Study. *Earth-Science Reviews*, 49(1-4): 223—259. doi: 10.1016/s0012-8252(99)00058-6
- Shane, P., Hoverd, J., 2002. Distal Record of Multi-Sourced Tephra in Onepoto Basin, Auckland, New Zealand: Implications for Volcanic Chronology, Frequency and Hazards. *Bulletin of Volcanology*, 64(7): 441—454. doi: 10.1007/s00445-002-0217-2
- Shane, P., Nairn, I. A., Martin, S. B., et al., 2008. Compositional Heterogeneity in Tephra Deposits Resulting from the Eruption of Multiple Magma Bodies: Implications for Tephrochronology. *Quaternary International*, 178(1): 44—53. doi: 10.1016/j.quaint.2006.11.014
- Shane, P., Smith, V., Nairn, I., 2003. Biotite Composition as a Tool for the Identification of Quaternary Tephra Beds. *Quaternary Research*, 59(2): 262—270. doi: 10.1016/S0033-5894(03)00012-7
- Smith, V. C., Pearce, N. J. G., Matthews, N. E., et al., 2011. Geochemical Fingerprinting of the Widespread Toba Tephra Using Biotite Compositions. *Quaternary International*, 246(1-2): 97—104. doi: 10.1016/j.quaint.2011.05.012
- Sun, C., Plunkett, G., Liu, J., et al., 2014. Ash from Changbaishan Millennium Eruption Recorded in Greenland Ice: Implications for Determining the Eruption's Timing and Impact. *Geophysical Research Letters*, 41(2): 694—701. doi: 10.1002/2013gl058642
- Sun, C., You, H., He, H., et al., 2015. New Evidence for the Presence of Changbaishan Millennium Eruption Ash in the Lake Sihailongwan, Longgang Volcanic Field, Northeast China. *Gondwana Research*, 28(1): 52—60.

doi:10.1016/j.gr.2015.01.013

- Tomlinson, E.L., Kinvig, H.S., Smith, V.C., et al., 2012a. The Upper and Lower Nisyros Pumices; Revisions to the Mediterranean Tephrostratigraphic Record Based on Micron-Beam Glass Geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 243–244: 69–80. doi:10.1016/j.jvolgeores.2012.07.004
- Tomlinson, E.L., Thordarson, T., Lane, C.S., et al., 2012b. Petrogenesis of the Sólheimar Ignimbrite (Katla, Iceland): Implications for Tephrostratigraphy. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 86(0): 318–337. doi:10.1016/j.gca.2012.03.012
- Xu, Y.G., Menzies, M.A., Thirlwall, M.F., et al., 2003. “Reactive” Harzburgites from Huinan, NE China: Products of the Lithosphere-Asthenosphere Interaction during Lithospheric Thinning? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(3): 487–505. doi:10.1016/s0016-7037(02)01089-x
- Zhao, H.L., Liu, J.Q., 2012. Cryptotephra Discovered in Gushantun Peat of NE China and Its Significance. *Seismology and Geology*, 34(3): 516–530 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等, 1999. 龙岗金垅顶子近代活动火山的岩石学与地球化学. *岩石学报*, 15(4): 584–589.
- 樊祺诚, 隋建立, 刘若新, 等, 2002. 吉林龙岗第四纪火山活动分期. *岩石学报*, 18(4): 495–500.
- 郭正府, 刘嘉麒, 储国强, 等, 2002. 湖光岩玛珉湖火山灰的成分及其来源. *第四纪研究*, 22(3): 266–272.
- 郭正府, 刘嘉麒, 樊祺诚, 等, 2005. 四海龙湾玛珉湖沉积物中碱流质火山灰的来源及其意义. *岩石学报*, 21(1): 251–255.
- 黄庭, 2013. 东北泥炭记录的全新世火山喷发事件及其古气候响应研究(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 梁细荣, 韦刚健, 邵磊, 等, 2001. Toba 火山喷发在南海沉积物中的记录——ODP 1143 站钻孔火山玻璃的证据. *中国科学(D辑)*, 31(10): 861–866.
- 刘祥, 张成梁, 1997. 龙岗火山群四海火山渣层——来自金龙顶子火山亚普林尼式火山爆发. *吉林地质*, 16(3): 1–8.
- 毛绪美, 洪业汤, 朱咏焯, 等, 2002. 金川泥炭沉积中火山喷发物的发现及其意义. *矿物学报*, 22(1): 9–14.
- 赵宏丽, 刘嘉麒, 2012. 东北龙岗火山区孤山屯泥炭中显微火山灰的发现及其意义. *地震地质*, 34(3): 516–530.