

长白山天池火山气象站期碱流岩辉石环带混沌吸引子的发现及意义

郭文峰^{1,2}, 刘永顺^{2*}, 吴才来^{1*}, 魏海泉³, 聂保锋², 彭年², 陈正全³, 雷敏¹

1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037;

2. 首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048;

3. 中国地震局地质研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: cnu901@126.com; wucailai@126.com

2017-05-24 收稿, 2017-07-25 修回, 2017-07-26 接受, 2017-09-14 网络版发表

国家自然科学基金(41602342, 40872062, 41372342, 41302266, 41002121)、北京市自然科学基金(1082006)和公益性行业科研专项(201211095-4)资助

摘要 火山岩中矿物的成分环带中蕴含着其生长过程中岩浆成分和温压等物理状态的变化信息, 对研究岩浆演化和火山喷发动力过程非常重要. 长白山天池火山气象站期碱流岩辉石具有明显的环带结构, 其成因尚未讨论. 本文通过辉石环带的电子探针分析, 发现MgO和Na₂O等元素的相对含量呈剧烈的振荡形态. 同时, 利用非线性时间序列分析的方法, 对MgO元素沿辉石环带成分进行了相空间重构的探索性研究. 结果发现, 辉石环带成分时间序列的相空间吸引子为混沌吸引子. 这说明辉石斑晶在生长时所处的系统具有高的自由度和高度的复杂性, 其结晶和生长时周围岩浆的成分是高度非稳态和不平衡的. 我们认为岩浆房补给混合和热对流作用过程导致辉石所处的岩浆成分在高MgO、低MgO之间激烈振荡变化, 形成了辉石环带成分的剧烈振荡. 而这些补给-混合-对流的过程可能最终导致岩浆房超压而发生溢流喷发.

关键词 天池火山, 碱流岩, 辉石环带, 非线性时间序列分析, 混沌吸引子, 岩浆混合

岩浆岩中矿物生长过程记录了岩浆成分演化过程以及岩浆物理参数, 如温度、压力等的信息^[1~3]. 利用矿物环带从中心到边缘的成分信息, 可以建立矿物的成分时间序列. 通过非线性时间序列分析的方法进行相空间重构可以研究矿物生长过程中记录的岩浆成分信息^[4~8]和岩浆系统的动力特性. 天池火山是东北亚最为活跃的活火山之一. 尤其是岩浆进化到晚期, 同样的过碱性成分, 却有波及日本北海道甚至格陵兰岛的千年大喷发, 也有如气象站熔岩流这样溢流式的较安静喷发^[9~11]. 千年大喷发, 由于在其喷发物中发现了幔源岩浆混合的证据, 被认为是补

给混合造成的爆发^[9]. 而对气象站碱流质熔岩, 有关喷发机制目前还未厘清. 碱流质熔岩一直被认为是粗面或粗安质地壳岩浆房经历大量分离结晶后喷出地表, 没有提及岩浆混合作用^[12~19]. 然而, 碱流岩中的辉石常常发育有环带结构^[20], 其核部到边部有明显的成分振荡变化, 这些用稳态岩浆房的分离结晶模式很难解释. 碱流岩高度富硅(SiO₂>70%), 斑晶含量较多(多者可达30%), 气孔含量较浮岩明显少, 这些因素导致其熔岩的黏度很大. 如此大黏度的岩浆如何能喷出? 单靠稳态岩浆房的分离结晶密度减小就可以喷出? 鉴于此, 本文拟通过电子探针单点和

引用格式: 郭文峰, 刘永顺, 吴才来, 等. 长白山天池火山气象站期碱流岩辉石环带混沌吸引子的发现及意义. 科学通报, 2017, 62: 3470–3478

Guo W F, Liu Y S, Wu C L, et al. Discovery and implications of the chaotic attractor from zoned pyroxene in Qixiangzhan comenditic lava, Tianchi volcano, NE China (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3470–3478, doi: 10.1360/N972017-00570

能谱快速线扫描, 重新审视辉石环带的成分变化特征, 利用成分时间序列进行了相空间重构的非线性时间序列分析方法对辉石环带进行了探索性研究, 试图厘清岩浆系统的动力特性和喷发机制。

1 地质背景及采样

天池火山气象站期熔岩流流出位置位于天池火山口天文峰北约100 m处, 呈流动的叠舌状、岩垅状沿着天池火山北坡分布(图1)。气象站期熔岩流是天池火山近代的一次小型的寄生火山喷发形成的^[21], 有关其形成时代目前尚在争论中^[22,23]。熔岩流的最前缘进入了针叶林带, 总长约6 km, 宽平均约为0.6 km。在气象站熔岩流动方向上舌状前缘可以分出若干个平台, 每个平台厚度约20 m, 形成阶梯状, 岩流宽度约500~800 m, 显示分期流动的特点^[24]。熔岩流主要由两种类型的岩石组成, 一种是含气孔且流动扭曲现象明显的灰色碱流岩, 另一种为致密状黑曜岩^[20]。熔岩流的顶部和底部是黑曜质碱流岩的表壳相, 中部是致密厚层与薄层相间且具有塑性变形的碱流岩内部相。据刘永顺等人^[20]的岩石学研究, 气象站期晚期碱流质熔岩属于高硅的碱性系列($\text{SiO}_2 > 70\%$, $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 10\%$)。熔岩的黏度甚高, 导致其流动缓慢, 保留了各种流动形态, 如, 熔岩穹丘、绳状流动构造、多层履带式流动纵剖面。本次研究样品采

自熔岩流的近缘区, 选择有代表性的新鲜样本。显微镜下显示碱流岩呈现斑状结构, 斑晶矿物主要有铁橄榄石、钙铁辉石、透长石和石英, 基质部分依次发育玻璃质结构、球粒结构和霏细结构, 在霏细结构的内部相基质中发育钠铁闪石、铁钠透闪石和钛铁矿显微斑晶。在斑晶矿物中只有辉石发育有环带, 且较为常见。本文挑选裂隙和杂质较少的且具有代表性的单颗粒辉石进行了非线性时间序列的探索研究。

2 方法

2.1 电子探针测试

辉石的电子探针分析在中国地质科学院矿产资源研究所的JXA8800R电子探针分析仪和牛津ISIS300X射线能谱仪上完成。测试电压为15 kV, 电流为20 nA, 电子束的直径为5 μm 。测试方式包括点分析和快速线扫描两种, 均横穿辉石的环带(图2(a), (b))。电子探针分析之前先在偏光显微镜下挑选辉石中包裹体及裂隙和其他矿物杂质少的辉石以备测试。同时, 在测试时, 点分析和线扫描的位置尽量避开辉石中的矿物杂质和裂隙。快速线扫描能快速捕捉到沿线元素的含量相对变化且是近连续测量, 但不能给出实际含量, 而且不同元素间不具有含量上的可比性。

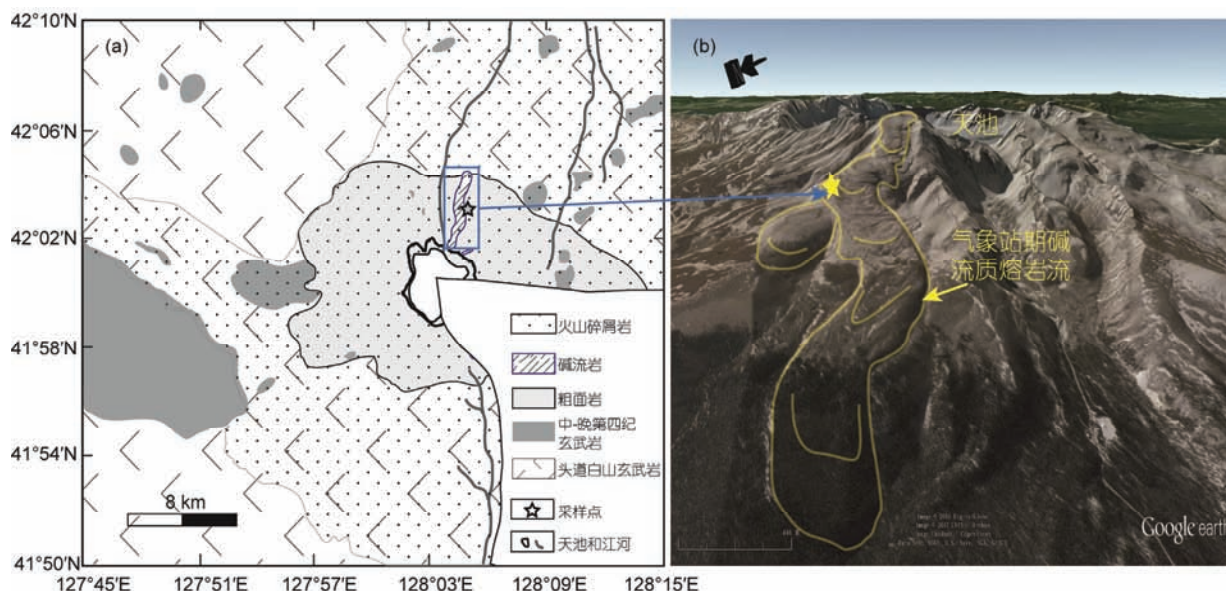


图1 (网络版彩色)天池火山地质简图(a)和气象站期碱流岩卫星影像(b)

Figure 1 (Color online) Simplified geological map of Tianchi volcano (a); a satellite image of Qixiangzhan lava (b)

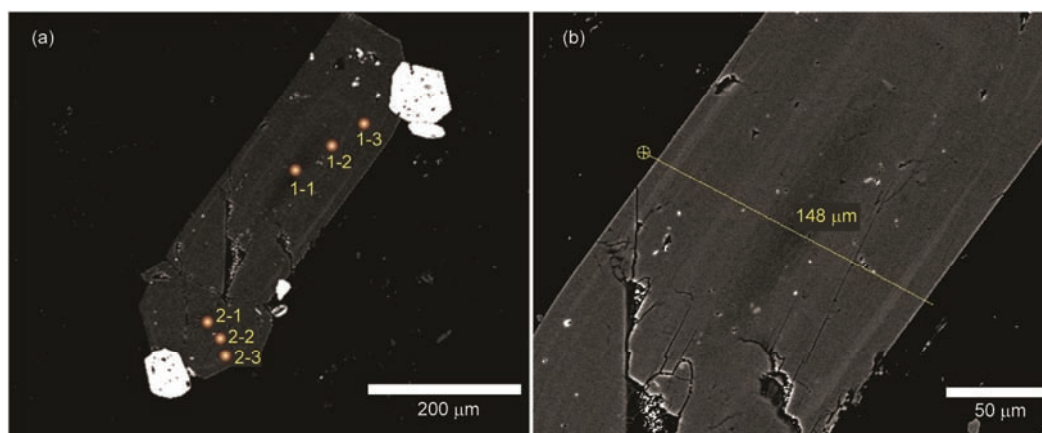


图2 (网络版彩色)辉石环带背散射图像. (a) 对应的背散射图像和探针点位; (b) 辉石线扫描位置, 带+符号端为起始点

Figure 2 (Color online) (a) Backscattered electrons (BSE) image of a zoning pyroxene, measurement positions are indicated by crosses for point analysis; (b) a line started with a circle for line-scan

2.2 时间序列相空间重构

矿物径向尺度与时间相关, 因此矿物的剖面成分可以作为时间成分序列来处理. 非线性时间序列相空间重构和庞加莱截面两种方法可以帮助直观理解系统的动力学属性. 庞加莱截面是吸引子图的某一横截面, 可以在二维图中显示吸引子内部的结构, 用于判断吸引子的离散和聚敛属性. 物理化学系统中的振荡形式与其背后的驱动力直接相关, 如周期性振荡一般对应周期性驱动力. 非线性时间序列的相空间重构和庞加莱截面方法可以直观地表现出系统的动力学属性, 是周期性变化系统、完全无规律的离散系统或是介于二者之间的吸引子系统. 不同的动力学系统对应着不同的吸引子和庞加莱截面结构. 完全随机的振荡序列(无穷大的自由度), 其吸引子相空间中是杂乱无章的而且充满整个相空间(图3(g)和(h)), 在庞加莱截面上为一些随机分布的截点, 且有布满整个截面区域的趋势(图3(i)). 确定性周期运动(如余弦振荡)相空间轨迹为椭圆(图3(a)和(b)), 庞加莱截面为有限个离散的点(图3(c)). 而混沌振荡序列的吸引子在相空间中的轨迹呈现出一定的规律性, 并且最终收缩到某一区域(图3(d)和(e)), 其庞加莱截面没有截面满布的趋势, 而是有层次的分布(图3(f)).

本文采用时延的重构方法, 其原理详细见文献[25]. 简单介绍如下: 某时间序列 $X_j(t)$, 如果给一个适当的时延 τ 和一个合适的维数 d 便可按照公式(1)对其动力系统进行相空间重构.

$$X_j = X[t + (j-1)\tau], j = 1-d, \quad (1)$$

其中, d 称之为嵌入维数, 因此, 相空间是由 $X_1=X(t)$, $X_2=X(t+\tau)$, $X_3=X(t+2\tau)$, $\dots$, $X_d=X[t+(d-1)\tau]$ 向量张成的 d 维空间. 确定时延 τ 的方法也有很多, 最常用的是采用互信息法^[26], 对嵌入维数 d 采用Cao氏算法^[27]来计算. 在重构了相空间吸引子后, 可以选择某个参考点计算吸引子的庞加莱截面.

3 结果

辉石的测点数据结果见表1. 线扫描结果见图4(a). 电子探针点分析的结果显示(表1), 除了辉石环带的 SiO_2 和 CaO 主要元素之外, 其他氧化物含量变化明显, 且核部较边部有高 MgO , Cr_2O_3 和低 Na_2O , FeO 的特点. 核部 MgO 为2.12%, 边部为1.22%, 而 Na_2O 核部为1.26%, 边部为1.71%. 线扫描横跨辉石环带补充了点分析的空间分辨不足. 线扫描长度为148 μm , 对应元素的成分剖面见于图4(a). 元素含量的总体趋势上, Si, Ca没有明显变化, Mg和Na分别显示出由核部到边缘振荡减小和增加的变化趋势, 这与点分析结果一致. 从单个元素含量的空间变化率来看, Mg, Na和Mn显示出剧烈振荡的变化, 而Si, Ca几乎平稳变化, 除了在辉石边缘的陡坡以及遇到裂隙和磷灰石杂质的是脉冲式变化(图4(a)). 为便于元素剖面间直观比较和进一步衡量线扫描的可信度, 将每个元素的剖面相对其最大值标准化(图4(b)). 可以看出, 在辉石矿物边界, 各元素台阶式变化, 遇到磷灰石等矿物杂点时Si出现负脉冲, 且对应的Ca剖面(图4(a))出现正异常. 因此利用Si, Ca剖面可有效地界定辉石和基质的边界, 鉴别出测线穿过裂隙和矿物杂

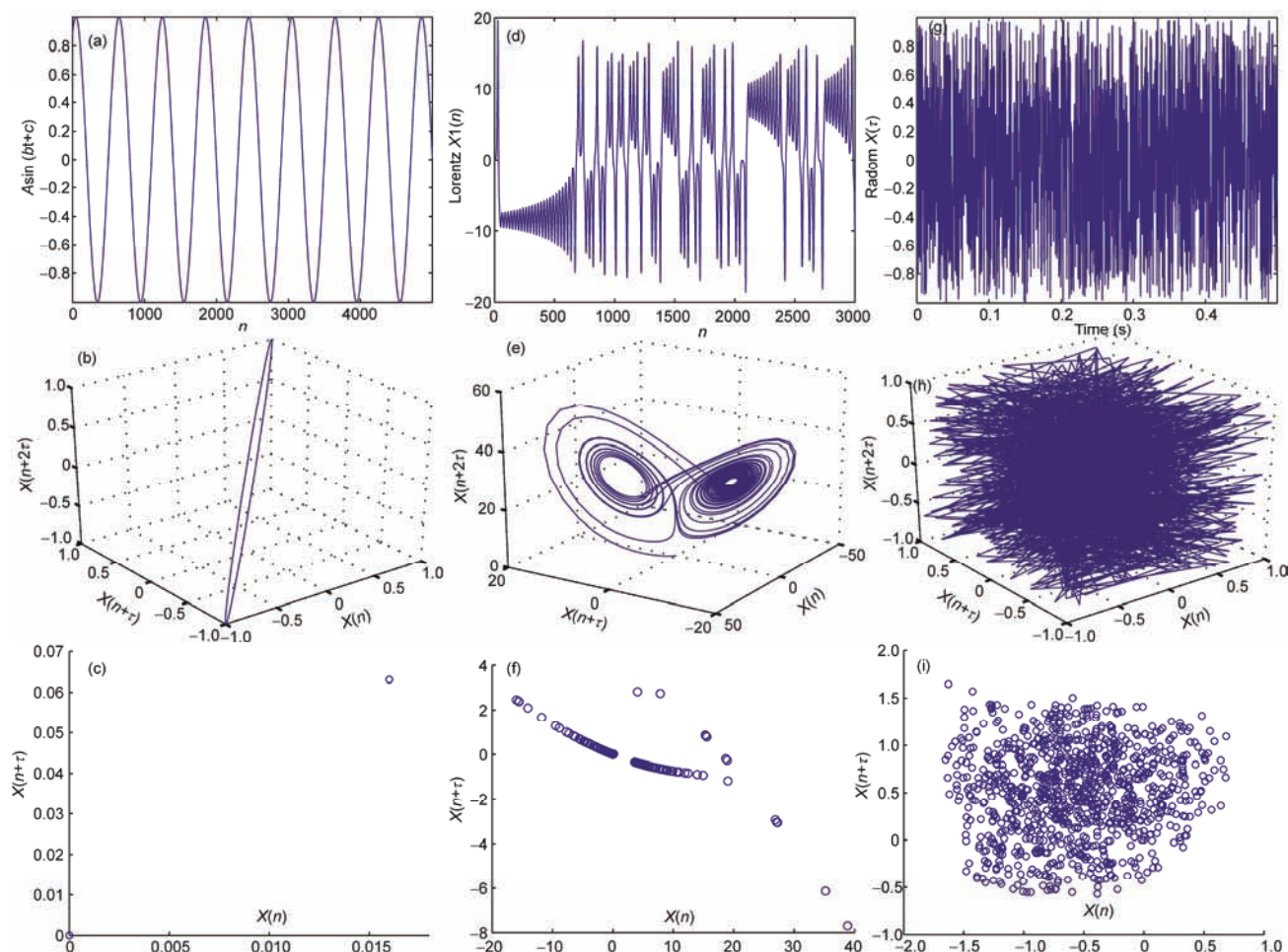


图3 (网络版彩色)三类系统的振荡序列图、三维相空间重构图和对应的庞加莱截面图。(a)~(c) 正弦函数; (d)~(f) 洛伦兹混沌吸引子; (g)~(i) 完全随机振动

Figure 3 (Color online) Three time series, their dimensional reconstruction phase space and Poincaré section of attractors for the deterministic system (sine function, (a)~(c)); the chaotic system (Lorenz, (d)~(f)) and the random system ((g)~(i))

质的位置及影响(图4(a)和(b)). Mg, Na和Mn振荡形式未受到磷灰石的明显影响,因为在磷灰石的位置和其他位置都显示相似的非线性振荡变化(图4(a)和(b)). 另外,辉石的背散射灰度的差异位置与Mg, Na剖面上的变化有一致的对应关系,从图4(b)箭头所指位置可以看出,灰度值小(颜色浅)的位置对应较高的Na值和较低的Mg值,灰度值大的位置对应低的Na值和较高的Mg值. 因此,本文认为线扫描结果是可靠的,即Mg, Na和Mn剖面的振荡变化型式是客观存在的,且Mg和Na呈现出对应的反相关关系.

为进一步研究这种振荡型式的系统动力学特征,本文利用Mg元素剖面进行非线性时间序列处理. 选择Mg元素是因为其在辉石的次要元素中含量最高(表1),系统误差对其的影响最小. 辉石环带中Mg的

成分时间序列的互信息计算结果如图5(a),可以看出当 $\tau=7$ 时其互信息值 $I(\text{bit})$ 达到了第一个极小值,所以延时 τ 取7. 以延时为7,用Cao氏算法来计算最小的嵌入维数,结果如图5(b). $E1(d)$ 是Cao自定义的一个函数^[27],可以简单地理解为虚假相空间中邻近点的距离和真实空间中邻近点的一个比较的参数. 当随嵌入维数 d 的增大, $E1(d)$ 不再增大时,说明重构的相空间可以完全地表达吸引子,而不会发生拓扑结构的扭曲和折叠. 从图5(b)中可以看出,当嵌入维数取3时 $E1(d)$ 达到了60%,斜率开始减小,维数为8时达到了饱和. 因此吸引子的拓扑维数应该小于8. 然而,由于可视化的局限,本文用三维的嵌入空间,时间延迟为7重构后相空间如图5(c),其庞加莱截面如图5(d). 从其重构后的相空间吸引子及其庞加莱截面的

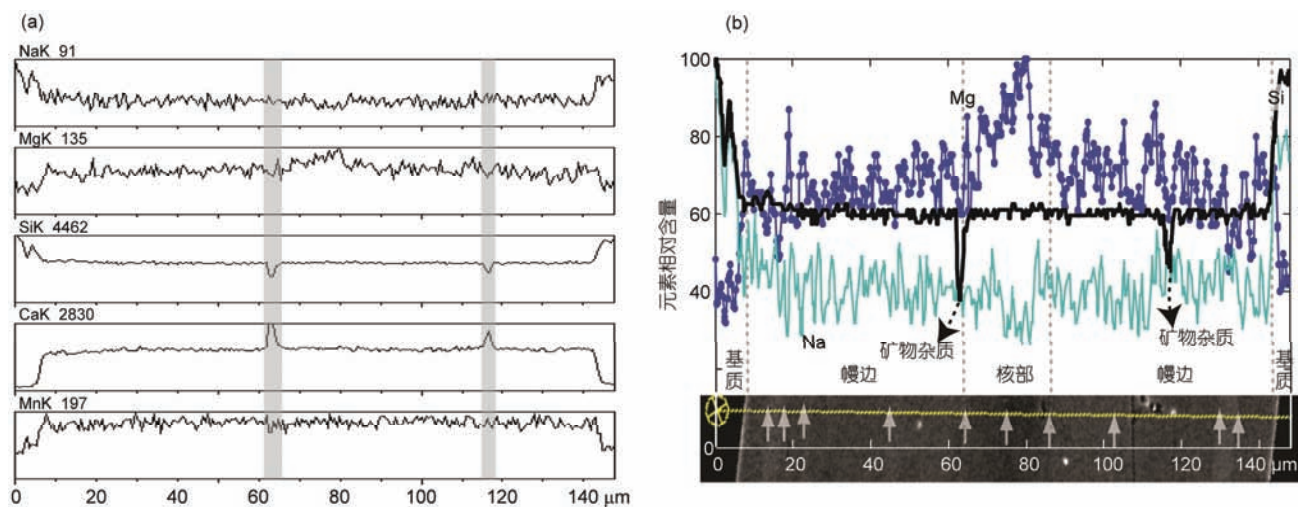


图 4 (网络版彩色)辉石环带线扫描分析及成分序列的标准化. (a) 辉石环带快速线扫描结果(图中阴影区标示受磷灰石杂点的影响范围); (b) 线扫描结果标准化后Na, Si和Mg的元素变化对比

Figure 4 (Color online) Electron probe line-scan results of zoned pyroxene and normalized the compositional time series of selected elements. (a) Results of relative concentration profile of elements (Na, Mg, Si, Ca, Mn) obtained by energy dispersive spectrum based on line-scan (the shaded area showed apatite affected position); (b) comparison of the normalized profile of Na, Si, and Mg by maximum value of each element

表 1 辉石电子探针成分(wt%)^{a)}

Table 1 Pyroxene compositions determined by electron microprobe analysis (wt%)

样点	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3
位置	核部	幔部	边缘	核部	幔部	边缘
Na ₂ O	1.39	1.34	1.71	1.26	1.54	1.92
MgO	2.12	1.61	1.54	2	2.08	1.22
Al ₂ O ₃	0	0	0	0	0	0
SiO ₂	48.28	47.96	47.91	47.23	47.74	47.79
P ₂ O ₅	0	0	0	0	0	0
SO ₃	0	0	0	0.04	0.1	0
K ₂ O	0.03	0.04	0.02	0	0.02	0
CaO	19.59	18.68	19.16	19.55	18.51	18.39
TiO ₂	0.05	0.16	0.16	0.12	0.12	0.4
Cr ₂ O ₃	0.19	0.1	0.21	0.25	0.09	0.04
MnO	0.78	0.78	0.76	0.73	0.86	1.09
FeO	26.33	28.01	27.44	27.24	27.87	28
总量	98.76	98.68	98.91	98.42	98.93	98.85

a) 测试单位: 中国地质科学院矿产资源研究所

形态来看, 辉石环带的成分时间序列的相空间吸引子为混沌吸引子, 其相空间的轨道最终发生收缩, 庞加莱截面介于周期运动和随机运动之间, 且有一定的有序结构.

4 讨论

众所周知, 影响矿物成分的因素有很多, 但主要

包括元素扩散、岩浆补给混合、岩浆温压条件改变等^[1~3]. 虽然元素扩散可能造成矿物成分剖面的变化, 但由于固体中元素扩散极慢, 扩散只能将元素在矿物与岩浆之间的陡坡浓度含量剖面变得平滑, 成分剖面的形态基本维持原型^[28], 更不能造成成分剖面的振荡变化型式. 显然辉石成分环带激烈的振荡不是元素扩散造成的. 研究显示熔体成分的变化(岩浆

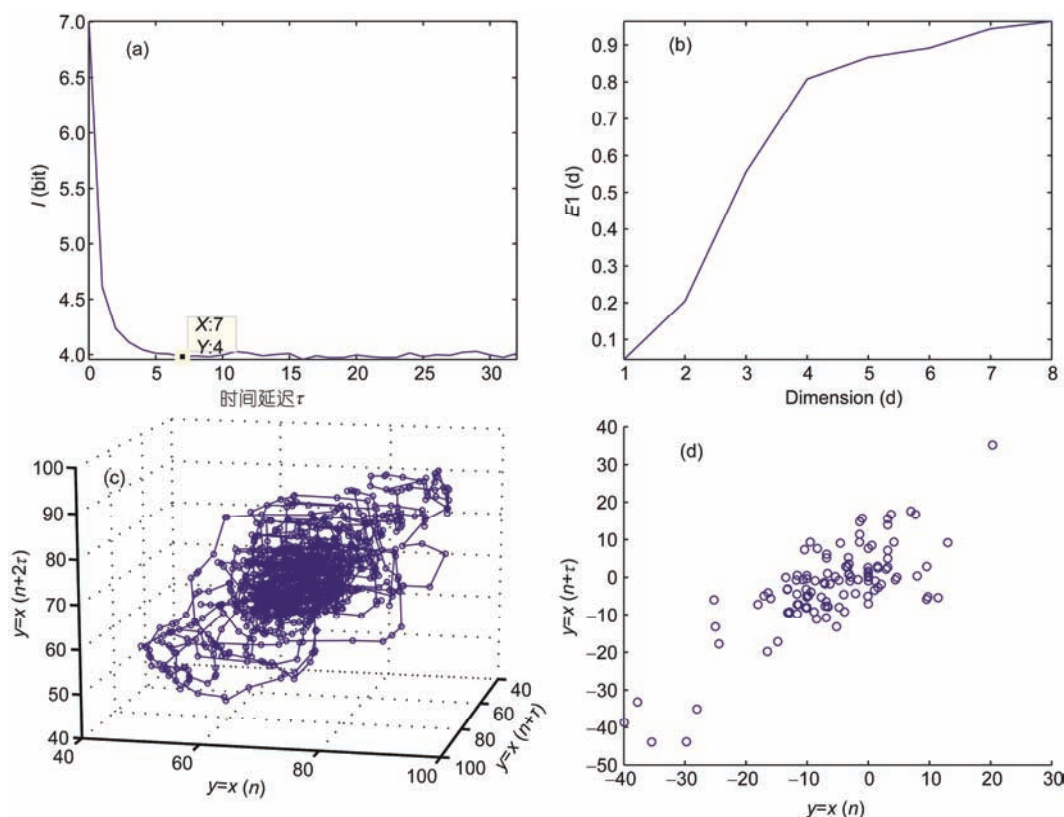


图5 (网络版彩色)辉石环带时间成分序列的相空间重构。(a) 互信息法计算结果;(b) 当 $\tau=7$ 时用Cao氏算法^[27]计算的最小嵌入维数关系图;(c) Mg元素序列的相空间重构图;(d) 庞加莱截面(参考点 $n=1000$)

Figure 5 (Color online) Phase space reconstruction of the extracted compositional time series of zoned pyroxene. (a) Results of mutual information calculation; (b) embedding dimension using Cao's method^[27]; (c) reconstructed phase space; (d) Poincaré section with $n=1000$ of Mg compositional series

补给混合)是影响矿物微量和次要元素变化的主要因素^[2],而温度和压力只能有选择性地控制部分元素的占位进而影响它们的含量。如,岩浆中由基性岩浆补给造成了斜长石中高An环带,而此环带中Sr, Mg, Fe也会改变。相反如果改变的是温压或水含量,则An也会受影响,但Sr, Mg, Fe不会明显变化^[2]。天池气象站期碱流岩中辉石成分的两个突出特点是:(1)核部较边缘有高Mg低Na;(2)除Ca和Si主要元素外,Mg, Na和Mn等次要元素,从核部到边缘既非连续光滑地减小,也非呈现台阶式地变化,而是激烈的振荡变化。辉石核部高Mg低Na,可能指示辉石晶核来自于较高Mg的岩浆,即,演化程度较低的岩浆,如粗安质岩浆。如果没有岩浆的补给事件,根据传统的稳态岩浆房演化理论^[2],随着岩浆房的分离结晶,岩浆成分向粗面质和流纹质演化,同时辉石中Mg的剖面应逐渐减小,而Na应逐渐增加。显然这样的趋势与本文辉石成分变化特点不符,因此可以说分离结晶

不是造成此不平衡结构的主控过程。而若岩浆房遭遇热的较高MgO岩浆补给时,残留岩浆会被加热,去气作用增强,岩浆房中水含量增加,黏度降低,很容易发生对流混合。此时,与辉石接触的岩浆成分不再稳定,造成辉石剖面成分Mg和Na等的振荡变化,并在岩浆房超压远大于围岩压力时的某个临界状态喷发。

从岩浆系统的动力特性来说,碱流岩辉石中Mg元素振荡曲线的相空间形态为混沌的奇异吸引子(图5),最小嵌入维数大于3,说明其系统并非一个周期系统或完全离散系统,而是一个混沌系统,具有较高的复杂性。矿物成分是由矿物结晶时其斑晶与熔体的界面局部区域的成分和热动力条件共同控制的,而辉石中元素的成分剖面强烈振荡形式反映出其生长时局部岩浆成分以及环境物理参数的多变性特征。而且造成矿物周边这些微环境(包括岩浆成分)激烈变化的时间很短。这与经典鲍文反应的稳态分离结

晶的岩浆房系统完全不同. 造成岩浆房失稳最可能的原因是岩浆房不断地接受补给. 岩浆混合系统的混沌动力学行为研究显示高温幔源基性岩浆补给到壳源进化岩浆房中, 通过液态岩浆间的混合、拉伸、折叠和扭曲等行为造成岩浆的微流场成分极大的不均一性^[8], 而且这些过程可以是几天或几小时的短小时内就能完成, 也正是这些过程最终造成辉石环带中次要元素成分的振荡变化.

应当指出通过现有的证据很难确定补给岩浆的归属, 需要矿物原位元素和同位素的研究进一步锁定补给端元成分. 但气象站期碱流岩中辉石成分环带与天池火山晚期其他喷发物中也发现有岩浆混合的证据^[14,29~32], 表明补给混合现象在天池火山近代

喷发的酸性岩浆中普遍存在, 这些证据表明了补给喷发可能是天池火山喷发的一个重要机制, 同时对现有的天池火山岩浆系统研究给以重要启示.

5 结论

长白山天池火山气象站期碱流岩中辉石环带的元素含量呈振荡变化. 辉石环带的Mg元素成分序列在相空间是一个混沌吸引子, 表明气象站期碱流岩在岩浆房演化过程中经历了失稳和高度不平衡的过程. 本文认为这种不平衡是高温基性岩浆补给与残留的碱流质岩浆混合造成. 岩浆混合作用在晚期酸性岩中普遍存在暗示了补给喷发可能是天池火山喷发的一个重要机制.

致谢 本研究成文过程中与中国地质大学(北京)的孙善平教授有所交流, 感谢两位审稿人的意见和建议.

参考文献

- Ginibre C, Wörner G. Variable parent magmas and recharge regimes of the Paríacota magma system (N. Chile) revealed by Fe, Mg and Sr zoning in plagioclase. *Lithos*, 2007, 98: 118–140
- Ginibre C, Wörner G, Kronz A. Crystal zoning as an archive for magma evolution. *Elements*, 2007, 3: 261–266
- Ginibre C, Wörner G, Kronz A. Minor- and trace-element zoning in plagioclase: Implications for magma chamber processes at Paríacota volcano, northern Chile. *Contrib Mineral Petrol*, 2002, 143: 300–315
- Higman S, Pearce T. Spatiotemporal dynamics in oscillatory zoned magmatic plagioclase. *Geophys Res Lett*, 1993, 20: 1935–1938
- Pearce T H. Recent work on oscillatory zoning in plagioclase. In: Parson I, ed. *Feldspars and Their Reactions*. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 421. Dordrecht: Springer, 1994. 313–349
- Perugini D, Busa T, Poli G, et al. The role of chaotic dynamics and flow fields in the development of disequilibrium textures in volcanic rocks. *J Petrol*, 2003, 44: 733–756
- Perugini D, Poli G, Valentini L. Strange attractors in plagioclase oscillatory zoning: Petrological implications. *Contrib Miner Petrol*, 2005, 149: 482–497
- Perugini D, De Campos C P, Ertel-Ingrisch W, et al. The space and time complexity of chaotic mixing of silicate melts: Implications for igneous petrology. *Lithos*, 2012, 155: 326–340
- Fan Q C, Sui J L, Sun Q, et al. Preliminary research on magma mixing and explosive mechanism of the Millennium eruption of Tianchi volcano (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2005, 21: 1703–1708 [樊祺诚, 隋建立, 孙谦, 等. 天池火山千年大喷发的岩浆混合作用与喷发机制初步探讨. *岩石学报*, 2005, 21: 1703–1708]
- Wei H Q, Liu R X, Fan Q C, et al. Active volcanoes in China and their relevant hazards (in Chinese). *Nat Mag*, 1998, 29: 196–200 [魏海泉, 刘若新, 樊祺诚, 等. 中国的活火山及有关灾害. *自然杂志*, 1998, 20: 196–200]
- Sun C Q, You H T, He H, et al. New evidence for the presence of Changbaishan Millennium eruption ash in the Longgang volcanic field, Northeast China. *Gondwana Res*, 2015, 28: 52–60
- Jin B L, Zhang X Y. Researching Volcanic Geology of Changbai Mountains (in Chinese). Yanbian: Education Publishing House of Northeast Korea Nation, 1994. 34–37 [金伯禄, 张希友. 长白山火山地质研究. 延边: 东北朝鲜民族教育出版社, 1994. 34–37]
- Liu R X, Fan Q C, Zheng X S, et al. The magma evolution of Tianchi volcano (in Chinese). *Sci China Ser D-Earth Sci*, 1998, 28: 226–231 [刘若新, 樊祺诚, 郑祥身, 等. 长白山天池火山的岩浆演化. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1998, 28: 226–231]
- Wei H Q. Tianchi Volcanoes, Changbaishan (in Chinese). Beijing: Seismological Press, 2014. 1–448 [魏海泉. 长白山天池火山. 北京: 地震出版社, 2014. 1–448]
- Xie G H, Wang J W, Basu A R, et al. Petrochemistry and Sr, Nd, Pb-isotopic geochemistry of Cenozoic volcanic rocks, Changbaishan area, Northeast China (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 1988, 4: 115–124 [解广轰, 王俊文, Basu A R, 等. 长白山地区新生代火山岩的岩

石化学及 Sr, Nd, Pb 同位素地球化学研究. 岩石学报, 1988, 4: 115–124]

- 16 Fan Q C, Liu R X, Wei H Q, et al. Petrogeochemical characteristics of Holocene Eruption of the Tianchi volcano, Changbai Mountains (in Chinese). *Geol Rev*, 1999, 45(Suppl): 263–271 [樊祺诚, 刘若新, 魏海泉, 等. 长白山天池火山全新世喷发与岩石地球化学特征. 地质论评, 1999, 45(Suppl): 263–271]
- 17 Li N, Fan Q C, Sun Q, et al. Magma evolution of Changbaishan Tianchi volcano—Evidences from the main phenocrystal minerals (in Chinese). *Acta Petrol Sin*, 2004, 20: 575–582 [李霓, 樊祺诚, 孙谦, 等. 长白山天池火山岩浆演化——来自主矿物成分的证据. 岩石学报, 2004, 20: 575–582]
- 18 Zou H B, Fan Q C, Yao Y P. U-Th systematics of dispersed young volcanoes in NE China: Asthenosphere upwelling caused by piling up and upward thickening of stagnant Pacific slab. *Chem Geol*, 2008, 255: 134–142
- 19 Zou H, Fan Q C, Zhang H, et al. U-series zircon age constraints on the plumbing system and magma residence times of the Changbai volcano, China/North Korea border. *Lithos*, 2014, 200: 169–180
- 20 Liu Y S, Nie B F, Sun S P, et al. Petrology of comenditic lava from the eruption at Late Qixiangzhan Stage in Tianchi volcano, Changbaishan Area (in Chinese). *Geoscience*, 2007, 21: 296–306 [刘永顺, 聂保锋, 孙善平, 等. 长白山天池火山气象站期晚期碱流质熔岩的岩石学研究. 现代地质, 2007, 21: 296–306]
- 21 Liu X, Xiang T Y, Wang X K. Episodes of Cenozoic volcanism in the Changbai mountains area (in Chinese). *Jilin Geol*, 1989, (1): 30–41 [刘祥, 向天元, 王锡魁. 长白山地区新生代火山活动分期. 吉林地质, 1989, (1): 30–41]
- 22 Wei H, Liu G, Gill J. Review of eruptive activity at Tianchi volcano, Changbaishan, northeast China: Implications for possible future eruptions. *Bull Volcanol*, 2013, 75: 1–14
- 23 Yang L, Wang F, Feng H, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology of Holocene volcanic activity at Changbaishan Tianchi volcano, Northeast China. *Quat Geochronol*, 2014, 21: 106–114
- 24 Li N, Liu R X, Wei H Q, et al. Study of modern erupted lava clastic flow of Qixiangzhan Formation of Tianchi volcano, Changbai Mountains (in Chinese). *Geol Rev*, 1999, 45: 272–277 [李霓, 刘若新, 魏海泉, 等. 长白山天池火山近代喷发中气象站组熔岩——碎屑岩流研究. 地质论评, 1999, 45: 272–277]
- 25 Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. In: Rand D, Young L S, eds. *Dynamical Systems and Turbulence*, Warwick 1980. *Lecture Notes in Mathematics*, vol 898. Berlin, Heidelberg: Springer, 1981. 366–381
- 26 Fraser A M, Swinney H L. Independent coordinates for strange attractors from mutual information. *Phys Rev A*, 1986, 33: 1134–1140
- 27 Cao L. Practical method for determining the minimum embedding dimension of a scalar time series. *Physica D*, 1997, 110: 43–50
- 28 Costa F, Coogan L, Chakraborty S. The time scales of magma mixing and mingling involving primitive melts and melt-mush interaction at mid-ocean ridges. *Contrib Mineral Petrol*, 2010, 159: 371–387
- 29 Liu R X, Li J X, Wei H Q, et al. Volcano at Tianchi Lake, Changbaishan MT—A modern volcano with potential danger of Eruption (in Chinese). *Acta Geophys Sin*, 1992, 35: 661–665 [刘若新, 李继泰, 魏海泉, 等. 长白山天池火山——一座具潜在喷发危险的近代火山. 地球物理学报, 1992, 35: 661–665]
- 30 Fan Q C, Sui J L, Li N, et al. The magmatism and interactive eruption of the two magma chambers in the Tianchi volcano, Changbaishan (in Chinese). *Acta Metall Sin*, 2007, 26: 315–318 [樊祺诚, 隋建立, 李霓, 等. 长白山天池火山双岩浆房岩浆作用与互动式喷发. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26: 315–318]
- 31 Wei H Q, Li C M, Jin B L, et al. The Tianchi forming cone eruptive magmatic evolutionary series of the Changbaishan and stratigraphic division (in Chinese), *Jilin Geol*, 2005, 24: 22–27 [魏海泉, 李春茂, 金伯禄, 等. 长白山天池火山造锥喷发岩浆演化系列与地层划分. 吉林地质, 2005, 24: 22–27]
- 32 Chen X W, Wei H Q, Yang L F, et al. Petrological and mineralogical characteristics of Tianchi volcano, Changbai Mountain: Implications for crystallization differentiation and magma mixing (in Chinese). *Acta Geosci Sin*, 2017, 38: 177–192 [陈晓雯, 魏海泉, 杨良锋, 等. 长白山天池火山的岩石矿物学特征——对结晶分异过程和岩浆混合作用的启示. 地球学报, 2017, 38: 177–192]

Summary for “长白山天池火山气象站期碱流岩辉石环带混沌吸引子的发现及意义”

Discovery and implications of the chaotic attractor from zoned pyroxene in Qixiangzhan comenditic lava, Tianchi volcano, NE China

GUO WenFeng^{1,2}, LIU YongShun^{2*}, WU CaiLai^{1*}, WEI HaiQuan³, NIE BaoFeng², PEN Nian², CHEN ZhengQuan³ & LEI Min¹

¹ Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China;

² College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

³ Institute of Geology, China Earthquake Administration (CEA), Beijing 100029, China

* Corresponding authors, E-mail: cnu901@126.com; wucailai@126.com

Mineral compositional analysis is a powerful tool for identifying both volcanic and petrogenetic processes. This property is observed because spatial variations in the composition of magmatic minerals record chemical and physical changes in the magma from which they crystallized. Thus, these variations can also be used to decipher the history of a magmatic system and its triggering mechanism prior to eruption. The Tianchi volcano, located in the Changbaishan volcanic region, is one of the most active and dangerous volcanoes in East Asia; however, the eruptional mechanism of most recent eruptions are not well-resolved, especially the comenditic lava flow in the Qixiangzhan stage, Tianchi volcano. We focused on the zoned patterns in pyroxene phenocrysts of the comenditic lava to decipher the magma process and triggering mechanism of this silicic lava eruption. We analyzed major and minor element concentrations by point measurement and line-scan across a zoned pyroxene grain using the electron probe micro-analyzer (EPMA) equipped with the energy-dispersive (ED) spectrum. We also extracted a compositional time series by considering the variation of zone thickness across oscillatory zoning and reconstructed the phase space of the compositional time series using the optimal time delay method. First, we calculated the optimal time delay of phase space reconstruction obtained from the first minimum method of mutual information, and we later determined the embedded dimension. Using two parameters (i.e., time delay and embedded dimension), we subsequently reconstructed the phase space. We also present the Poincaré section of the reconstructed system. The results of EPMA point measurement (Table 1 and Figure 4) showed that the zoned pyroxenes have higher MgO (2 wt%–2.12 wt%) and lower Na₂O (1.26 wt%–1.39 wt%) in the core compared with the rim (MgO, 1.22 wt%–1.54 wt%; Na₂O, 1.71 wt%–1.92 wt%). The results of the line-scan of EPMA-ED showed that the normalized concentration of each minor element (MgO, Na₂O, MnO) exhibits an intense oscillatory variation (Figure 4). Meanwhile, in the reconstructed phase space (Figure 5(c)) and the Poincaré section (Figure 5(d)), the compositional time series of Mg exhibits a chaotic attractor. This attractor is different from the periodic oscillation attractor and the completely random oscillatory dynamic system (Figure 3). These features indicated that the pyroxene phenocrysts grow in a system with a high degree of freedom and complexity and the magma composition around pyroxene changed notably and quickly during crystallization. These features lead us to believe that the oscillatory zoning observed in the Qixiangzhan comenditic lava is not the result of a simple fractional crystallization process, which generally occurred in the stable magma chamber. Although such a process may lead to compositional zoning in the pyroxenes, it cannot form oscillatory zoning. A simple, closed-system fractional crystallization process will produce a periodic oscillation attractor instead of a strange attractor in their reconstructed phase space. A feasible process that may account for the oscillatory zoning features in the Qixiangzhan comenditic lava is an interaction between two (or more) compositionally distinct magmas (magma mixing). This process can create strong heterogeneities within magma bodies in a short time and on a very short length scale. More importantly, this process can produce a strange attractor in the reconstructed phase space of a zoning mineral. These features are all consistent with what we have obtained from the zoned pyroxene in the Qixiangzhan comenditic lava. Thus, we believe that the Qixiangzhan comenditic lava results from magma mixing or the magma recharge process. The mixing and convection processes of infilled primary magma and evolved magma can accelerate the vesiculation of the magma chamber, thereby causing an eruption. Combined with the frequent occurrence of magma recharge or magma mixing evidence in the latest eruptions of the Tianchi volcano, we believe that the infilling of primitive magmas plays a key role in the triggering mechanism of the Tianchi volcano.

Tianchi volcano, comenditic lava, zoning pyroxene, nonlinear time series analysis, chaotic attractor, magma mixing

doi: 10.1360/N972017-00570