

# 长白山火山最新监测信息\*

刘国明<sup>1</sup> 孙鸿雁<sup>2</sup> 郭峰<sup>1</sup>

LIU GuoMing<sup>1</sup>, SUN HongYan<sup>2</sup> and GUO Feng<sup>1</sup>

1. 吉林省长白山天池火山监测站, 安图 133613

2. 辽宁省地震局, 沈阳 110000

1. *Monitoring Station of the Tianchi volcano observatory, Jilin Earthquake Administration, Antu 133613, China*

2. *Liaoning Earthquake Administration, Shenyang 110000, China*

2011-07-01 收稿, 2011-08-31 改回.

**Liu GM, Sun HY and Guo F. 2011. The newest monitoring information of Changbaishan volcano, NE China. *Acta Petrologica Sinica*, 27(10):2905–2911**

**Abstract** Temperatures of two hot springs around the Changbaishan volcano (NE China) have simultaneously increased about 3°C since May 2010 based on the newest monitoring results of the Changbaishan Volcano Observatory. Moreover, the altitude of northern slope of the Changbaishan volcano cone decrease about 12.72mm in 2010 whereas it increases around 4mm/a before 2009. This study preliminarily discusses the possible reasons for occurrence of above observations and precludes a link to the active phase of the Changbaishan volcano in the near future. Because the active period of the volcano is characterized by large amounts of volcanic earthquakes swarms and sharp increase in mantle-derived He contents, more precise prediction should be made on the base of detail monitoring work on volcanic earthquakes and volcanic gases in future. Using N<sub>2</sub>-He-CO<sub>2</sub> ternary diagram, we recognize that the concentration of He increased aggressively from 2002 to 2005, and the gases in the ternary diagram immigrated to the He apex during the primitive perturbation episode. Changbaishan volcano has entered into a quiescent episode since 2005 and the emitted gases began to immigrate to the N<sub>2</sub> apex. The variation of He concentration in the emitted gases reflects the characteristics of gas composition evolution in magma chamber.

**Key words** Volcano; Volcanic gas; Leveling measurement; Monitoring; Changbaishan

**摘要** 长白山火山最新监测结果显示,自2010年5月份开始,聚龙温泉2个泉点水温同步上升了3°C;2010年长白山北坡垂直位移量打破了火山锥体每年升高4mm左右的规律;与2009年相比,火山锥体的位移在垂向上发生逆转,海拔最高的水准点在1年内突降12.72mm。本文针对上述2个最新的火山监测信息进行了报道,并对造成这种变化的可能原因进行了讨论。火山活动进入活跃时段的标志是大量火山地震、震群的发生,以及幔源岩浆气体He含量大幅度上升。然而,现阶段长白山火山区并未出现这2种现象。因此,本文讨论的2个异常还不足以作为长白山火山已经进入新的活跃时段的证据,准确的预测应该密切关注火山地震和幔源气体含量的变化。最后通过N<sub>2</sub>-He-CO<sub>2</sub>三角图解初步研究了天池火山气体来源,结果显示:2002~2005年火山出现“初始扰动”,深部气体He含量升高,三角图解中气体向He角运移;2005年后火山转入平静状态,气体组份又开始向N<sub>2</sub>角运移。He浓度的变化特征反应了岩浆房内岩浆成分的变化过程。

**关键词** 火山;火山气体;水准;监测;长白山

**中图法分类号** P317.6

## 1 引言

长白山火山是一座大型复式层状火山,是中国最具潜在

喷发危险的活火山。该火山位于西太平洋板块向欧亚板块俯冲的前缘区,板块运动对长白山火山的活动具有重要影响(Liu *et al.*, 2004; Wu *et al.*, 2009)。监测数据显示,2002年7月以来,长白山小震活动增强,形变量突升,流体地球化学

\* 本文受国家自然科学基金项目(40972047)资助。

第一作者简介:刘国明,男,1971年生,高级工程师,地球物理专业,E-mail: cbslmg@126.com

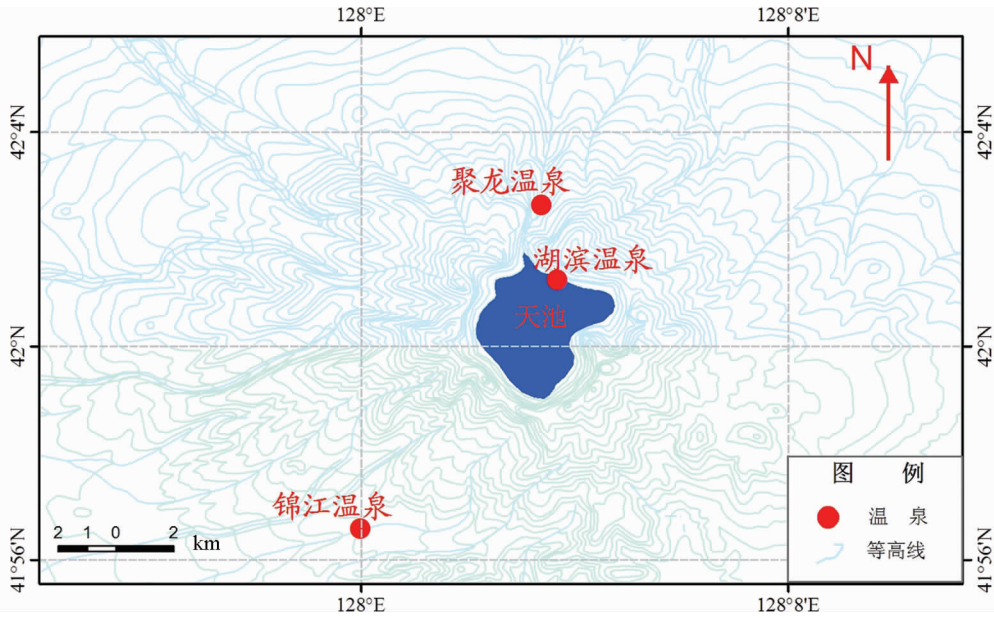


图1 长白山火山温泉点分布示意图

Fig. 1 Schematic map of hot springs of Changbaishan volcano

监测手段的几个测项呈异常状态,表明长白山火山进入“初始扰动”时段。但从2005年8月份开始,长白山火山地震活动降低,形变量恢复到正常背景值水平,流体地球化学各项异常指标也基本趋于正常,表明长白山火山由“扰动时段”进入新的“平静时段”(Liu *et al.*, 2011)。火山活动的不同阶段往往伴随着火山区温泉水温度的大幅度变化(Dowden *et al.*, 1991; Rowe *et al.*, 1995; Rymer *et al.*, 2000; Chiodini *et al.*, 2002),以及火山锥体垂直位移的显著变化(Delaney and McTigue, 1994; Sigmundsson *et al.*, 1997; Dzurisin *et al.*, 2002)。我们应用最新的温泉水温测试数据和水准测试数据对长白山天池火山的活动状态进行了初步研究。

## 2 最新的观测数据

### 2.1 温泉水温测试数据

自1999年7月开始,长白山火山监测站选取聚龙温泉、锦江1号泉等温泉进行温泉逸出气体观测,聚龙温泉8<sup>#</sup>、9<sup>#</sup>和15<sup>#</sup>泉每3d取样并测试1次,锦江1号泉每年取样并测试1~2次,另外还对湖滨温泉做过几次观测。选取泉水中CO<sub>2</sub>、He、H<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>和CH<sub>4</sub>作为测项,同时进行温泉水温度的测定。1999~2006年使用北京分析仪器厂生产的SQ-206型气相色谱仪进行观测,2006年之后使用北京分析仪器厂生产的SP-3420型气相色谱仪进行观测。温度测试使用的温度计是北京东方明光电子科技有限公司生产的DF-201A型数字温度计,观测精度为0.1℃。

2005年因当地旅游集团进行温泉水系统改造,8<sup>#</sup>泉遭到破坏。考虑到8<sup>#</sup>泉和9<sup>#</sup>泉距离非常接近,以往观测到的各气

体组分变化基本同步,因此8<sup>#</sup>泉停止观测,以后只对9<sup>#</sup>和15<sup>#</sup>泉进行观测。这2个温泉相距大约15m,其中9<sup>#</sup>泉位于15<sup>#</sup>泉东南方向(图1)。本文使用的数据是1999年7月至2011年7月份的泉水温度观测数据。

### 2.2 水准观测网和观测数据

吉林省地震局在长白山火山的北坡和西坡分别布设了2条精密水准路线。北坡水准路线位于长白瀑布之下至黄松浦之间,全长约24.8km,相对高差约901m。西坡水准路线位于天池至西门之间,全长约30km,相对高差约1084m(图2)。

2002~2005年使用德国蔡司Ni004型光学水准仪、水准标尺进行测量;2006~2010年使用瑞士徕卡DNA03型电子水准仪、条码尺进行测量。实测每千米偶然中误差为 $\Delta M = 0.13\text{mm}$ 。每次测量前都对仪器和标尺进行了必要的检验,观测周期为每年1次,观测时间基本在8~9月份。

## 3 对实际观测数据的解释

### 3.1 聚龙温泉温度变化分析解释

温泉逸出气体组份浓度变化比较大,我们采用观测数据的月均值作为指标进行地震和火山活动趋势判定。

2个泉点的泉水温度变化基本同步。自2002年5月份开始,2个泉点的泉水温度同步抬升了接近2℃,9<sup>#</sup>泉水温由71℃上升到73℃左右,15<sup>#</sup>泉水温由69℃上升到71℃左右。同年7月份开始,长白山火山进入“活跃时段”。此后泉水温度保持在高值附近,并缓慢上升,到2010年4月份,9<sup>#</sup>泉水温

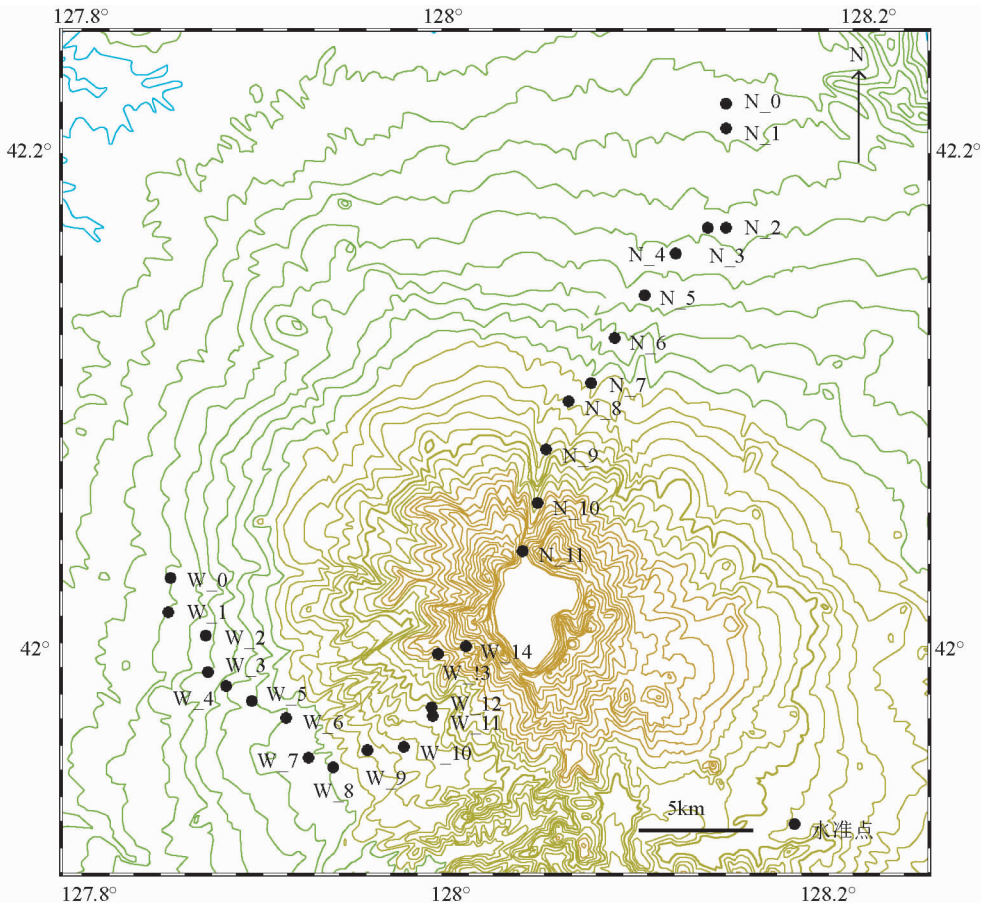


图2 长白山火山水准观测网络

Fig.2 Leveling network of Changbaishan volcano

达到74℃左右,15<sup>#</sup>泉水温达到72℃左右。2010年5月份开始2个泉点水温再次突升,上升幅度达3℃,9<sup>#</sup>泉水温上升到77℃左右,15<sup>#</sup>泉水温上升到74℃左右(图3)。发现这一情况后,火山监测人员对取样点观测环境进行了调查,认为观测环境未发生任何变化,同时还把测量水温的数字温度计送到计量部门进行了严格的标定,标定结果合格,完全满足观测要求,证明观测数据真实可靠。2010年10月份开始泉水温度恢复到背景值,但从2011年4月份开始2个泉点水温再次升到高值,目前仍保持在高值状态。需要说明的是2011年1~3月份因观测仪器故障,临时停测3个月,这3个月没有数据,所以2个泉点水温的再次上升也可能在2011年4月份之前就开始了。2002年温泉水温度的升高对应了一个火山活跃时段,那么2011年这次泉水温度的上升幅度比2002年那次还要高,但到目前为止,长白山火山还没有发生与之能对应的火山活动事件。2011年3月11日距离长白山火山1000km之外的日本发生了9级大地震,长白山泉水温度升高这一事件,是否可以看作日本大地震的远场前兆?这一问题尚值得商榷。目前2个泉点温度仍保持在高值状态,这一现象值得有关研究人员密切关注。

### 3.2 其它温泉点逸出气体温度变化分析

除了在聚龙温泉进行定期取样外,我们还在锦江1号温泉、湖滨温泉和长白县十八道沟温泉进行过一些季节性取样观测。因其它温泉点距离实验室比较远,取回的气体经过较长时间的运输后分析误差比较大,只能作为参考依据,但各温泉点的水温相对准确,在这里进行概要分析。

从表2可见锦江温泉和湖滨温泉自2001年以来,泉水温度并未发生显著变化,2个泉点10a的温度差在2℃以内。2010~2011年因谣传长白山天池火山将要爆发,我们对长白县十八道沟温泉进行了2次温度测量,第一次测量时间是2010年7月25日,泉水温度为35.5℃,第二次测量时间是2011年1月21日,泉水温度是35.6℃。2次测量相距半年,温度差仅0.1℃。

锦江温泉、湖滨温泉和长白县十八道沟温泉均与河水混在一起,测定泉水温度时会受到较大的人为影响,2℃之内的温差变化完全可能是取样人员变化或者天气变化等原因引起的,不应视为异常。因此综合以上分析认为除了聚龙泉水温存在异常外,其它温泉点均未出现水温变化的异常。

上官志冠等(2006)根据稳定同位素分馏原理,研究了

表1 聚龙温泉气体成分的平均值

Table 1 Annual mean value of gas composition of the Julong hot springs

测项 泉点 时间	CO <sub>2</sub> (%)	He ( $\times 10^{-6}$ )	H <sub>2</sub> ( $\times 10^{-6}$ )	O <sub>2</sub> ( $\times 10^{-6}$ )	N <sub>2</sub> ( $\times 10^{-6}$ )	CH <sub>4</sub> ( $\times 10^{-6}$ )	水温 (°C)
1999	85.7	20.4	12.3	102964	2724648	852.6	74.4
2000	94.3	34.1	9.0	36453	134136	6347	74.1
2001	92.3	16.3	4.1	2532	28891	2533	72.1
2002	91.2	17.6	4.8	6111	47304	1337	73.4
2003	97.2	173.8	321.5	4847	15083	1840	74.6
2004	96.6	136.3	49.0	8288	18770	2339	74.0
2005	96.2	12.3	109.3	9666	21763	2604	74.0
2006	93.3	115.0	77.4	17347	48673	3524	74.1
2007	90.2	14.0	8.7	19696	75482	2836	75.5
2008	84.2	28.4	8.9	31547	118029	3801	75.5
2009	83.1	21.7	9.4	34821	131382	5036	75.1
2010	82.7	14.1	8.5	41675	155110	3937	75.3
2011	79.1	18.6	10.6	48368	157752	3248	77.6
1999	93.6	10.9	10.6	33184	113714	2904	70.8
2000	92.8	82.6	18.3	33752	103319	4134	71.6
2001	95.4	3.8	4.2	2631	29827	1013	68.6
2002	94.2	12.1	5.0	4308	22558	1516	70.2
2003	97.0	291.5	197.1	4281	13155	1702	71.4
2004	97.1	246.2	518.5	5559	18103	2020	70.8
2005	96.0	13.3	10.6	9425	24823	2371	72.0
2006	93.8	235.5	118.3	16975	55837	2047	71.7
2007	90.1	3.5	1.2	19750	69369	1678	72.6
2008	85.3	12.3	2.7	32677	116581	2507	72.7
2009	86.3	4.7	3.2	27501	100517	2811	72.3
2010	84.5	11.0	7.4	32490	119590	1301	73.0
2011	80.4			44809	150666	3380	73.8

注:测试地点:聚龙温泉;测试人员:郭峰、刘国明等

表2 锦江温泉和湖滨温泉年均温度(°C)

Table 2 Annual mean value of temperature of Jinjian hot spring and Hubin hot spring (°C)

时间 泉点	2001	2002	2003	2004	2005	2007	2008	2009	2010	2011
锦江	58	57.7	56.6	57.5	57.7	56.7	59.4	59.2	59.1	
湖滨						13.5	10.8			12.5

注:测试地点:锦江温泉、湖滨温泉;测试人员:郭峰、刘国明等

天池火山区3个泉群CH<sub>4</sub>碳同位素组成特征和气源区温度值的差异,认为3个泉群可能存在3种不同的岩浆气体释放方式:

(1) 锦江温泉群逸出气体可能直接来自壳内岩浆囊,岩浆气体从岩浆囊顶部附近沿深大断裂逐渐向地表迁移释放;

(2) 聚龙温泉群逸出气体初始源区可能也是壳内岩浆囊,但岩浆来源气体可能是先转移至浅部地热储中,并经过较长时间的滞留后,再与地热水一起沿较浅的活动断裂向地表迁移释放;

(3) 湖滨温泉群逸出气体很可能直接来自上地幔,是上次火山喷发活动的残余气体。

在长白山火山的“活跃时段”(2002年7月~2005年7月)开始之前3个月,聚龙温泉群2个泉点温度同步突升2°C,2010年5月2个泉点又同步突升3°C,而在聚龙温泉出现水热活动明显变化的这个时间内,锦江温泉群和湖滨温泉群水热活动几乎未出现任何异常。笔者认为出现这种情况

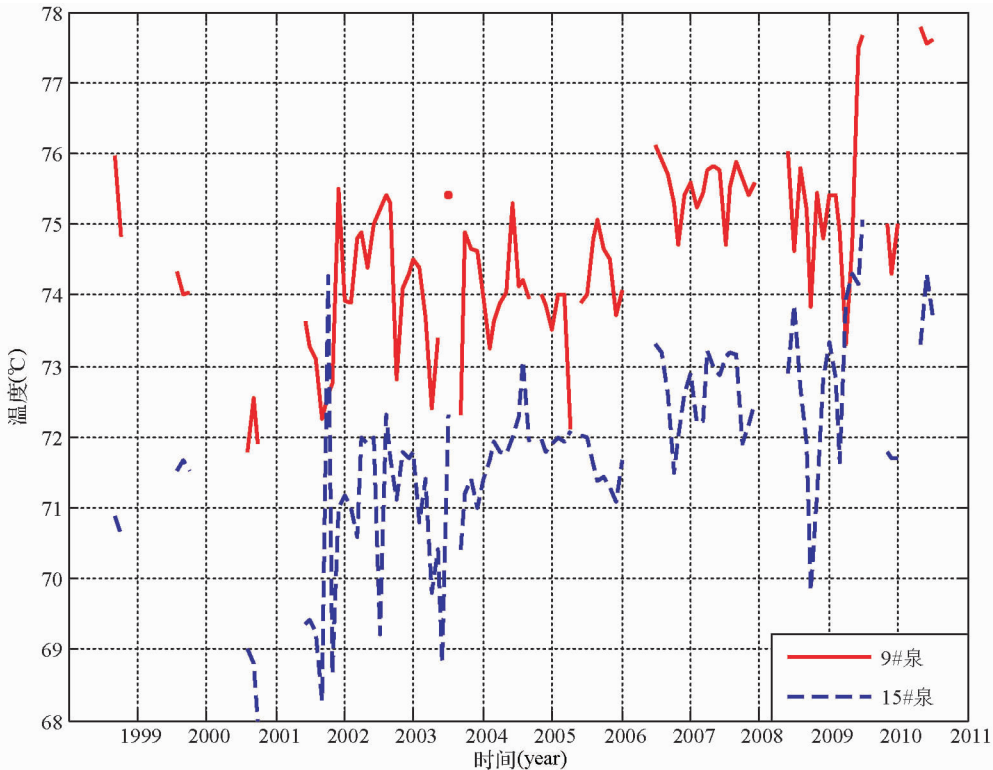


图3 聚龙温泉2个泉点温度变化图

Fig. 3 Variation of temperature of the two hot springs in Julong hot spring area

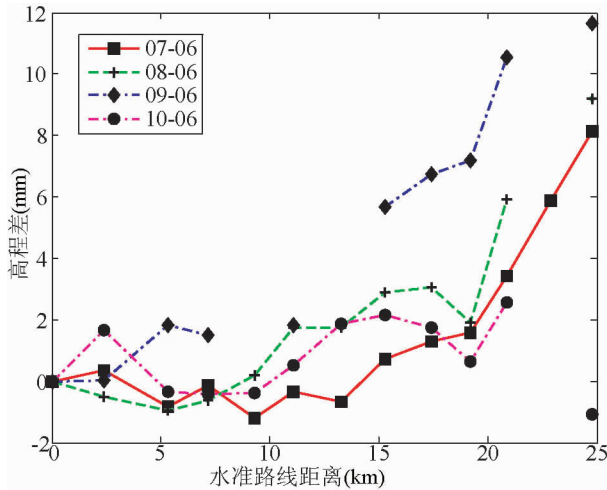


图4 长白山火山北坡2006~2010年各点水准高程变化(据李克等,2009,有修改)

Fig. 4 Elevation variation of northern slope of Changbaishan volcano from 2006 to 2010 (modified after Li *et al.*, 2009)

的可能原因是,这3个泉群的岩浆气体释放方式不同,因为聚龙温泉群下方存在浅部热储,逸出气体沿较浅的活动断裂向地表迁移释放,所以对温度的反应可能更直接更明显。

### 3.3 最新山体垂直位移变化情况分析

2006年之后因更换水准观测仪器产生了系统误差,导致2006年以后的高差产生了“假位移”,我们对更换仪器后的测量数据进行了重新分析。

图4、图5给出2006~2010年期间长白山天池北坡和西坡各个水准点的高程差变化。图4中部分曲线不连续的原因是个别水准点丢失。

2006年开始启用新的光学水准仪,2007~2010年的观测数据分别和2006年的观测数据相比较,各水准点的当年实测相对高程分别减掉2006年对应水准点的相对高程,获得该点的高程差。总体上长白山北坡各水准点位的相对高程呈缓慢抬升状态,2006~2009年P13点共上升了近12mm。但2010年各点位的垂直位移改变了原来的规律,尤其是P13点相对2009年,其相对高程下降了12.72mm(图4)。

郭良迁应用1951~1982年的一等水准资料,研究了东北地区的现代垂直形变,发现仅该区南部的吉林~通化地区现代垂直形变表现为上升,上升速率是 $4\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$ (郭良迁,1990),长白山火山与通化地区地理位置相邻,同处于西太平洋板块向欧亚板块俯冲带的前缘,因而这一垂直形变上升速率可做为长白山火山锥体垂直形变的参考背景。2002~2005年长白山火山地震活跃时段,抬升速率加剧,3年累计抬升68.12mm,之后火山地震活动减弱,火山锥体上升也恢复到正常水平(Liu *et al.*, 2011),但2010年北坡锥体垂直位移的转向应引起有关研究人员的注意。观察到这种异常后,监测人员对仪器和观测方法进行了检查,对监测结果进行了

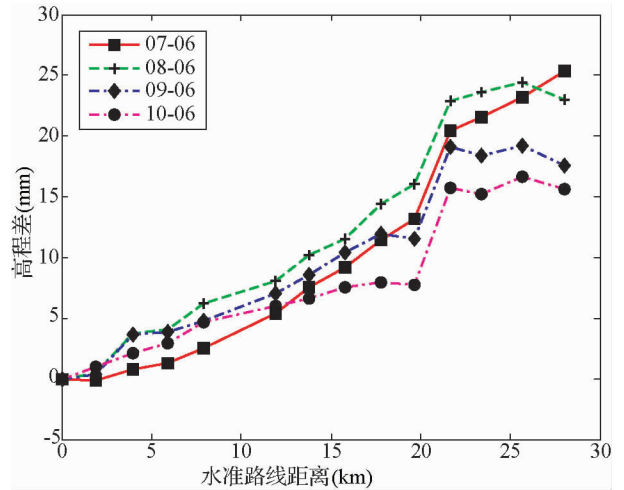


图5 长白山西坡2006~2010年各点水准高程变化(据李克等,2009,有修改)

Fig. 5 Elevation variation of western slope of Changbaishan volcano from 2006 to 2010 (modified after Li *et al.*, 2009)

反复核算,认为观测过程中严格按水准测量流程操作,往返测量闭合差完全符合测量规范,观测结果计算准确,不可能存在误差。那么长白山北坡火山锥体的这个下降异常就是客观存在,由于这种下降异常刚出现1a时间,更详尽的解释应该通过以后几年的监测数据进行对比分析才能得到。

2007年相对于2006年,长白山西坡火山锥体抬升了25.34mm,此后直到2010年,西坡火山锥体一直呈缓慢下降的状态。2010年锥体相对2009年下降了2mm(图5)。也就是说,通过对2006年以来长白山北坡和西坡2条水准路线观测资料的对比研究,北坡火山锥体于2010年出现了比较大的方向逆转异常,而西坡火山锥体一直处于缓慢下降状态,未发现异常。

## 4 火山气体来源变化初步分析

为了验证2002~2005年长白山火山扰动前后火山气体的变化规律,我们分3个时段讨论火山气体来源的变化。1999年7月至2002年6月为第一时段,该时段内火山地震活动较弱;2002年7月至2005年7月为第二时段,该时段内发生了大量的火山地震,长白山火山进入“初始扰动”阶段;2005年8月至目前(2011年7月)为第三时段,该时段火山活动又转入平静阶段,地震活动性也恢复到第一阶段的水平(Liu *et al.*, 2011)。三角图解是研究火山气体来源变化规律的有效方法(Lee *et al.*, 2008; Chiodini *et al.*, 2002; Priatna and Kadarsetia, 2007)我们对9#泉和15#泉分别取3个时段内每个月He、N<sub>2</sub>和CO<sub>2</sub>的平均值做He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub>三角图解(图6、图7),2个泉点在第二时段He值明显高于其它2个时段,且达到最高值。这说明在长白山火山活跃时段幔源气体成

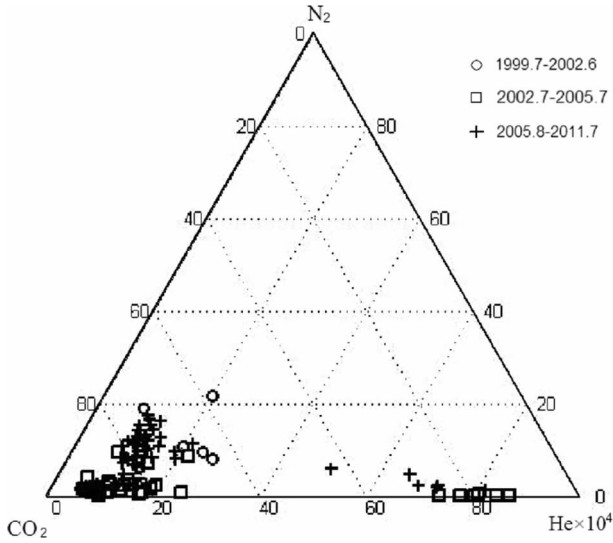


图6 长白山火山9<sup>#</sup>泉 He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 三角图解

Fig. 6 Ternary diagram of He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> of the gas samples from 9<sup>#</sup> hot spring of Changbaishan volcano

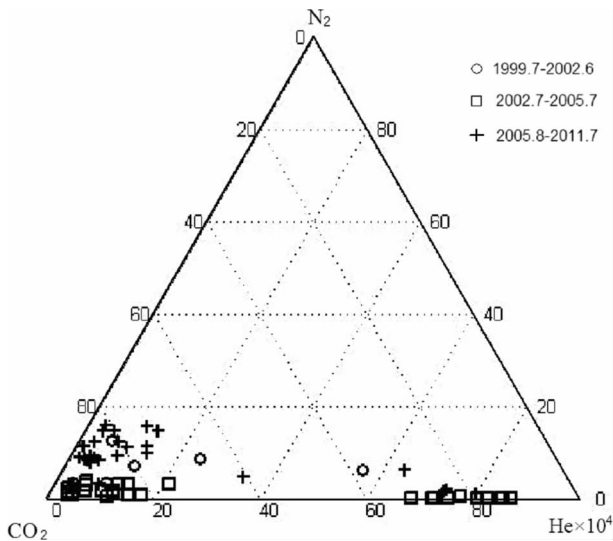


图7 长白山火山15<sup>#</sup>泉 He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 三角图解

Fig. 7 Ternary diagram of He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> of the gas samples from 15<sup>#</sup> hot spring of Changbaishan volcano

分增加了,在火山活跃过后再次转为平静期后,He 值又重新回到第一时段的水平。幔源气体成分 He 值在长白山火山经历的这 3 个活动阶段的变化很好地反应了幔源气体的变化过程,与火山地震活动相呼应。从 2 个泉点的 He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 三角图解中还可以看出,在第三时段气体成分开始向 N<sub>2</sub> 角迁移,达到最高值。至少有 3 种可能的地球化学过程单独或者同时作用会产生这种变化:(1) 温泉逸出气体在上升过程中混入空气或者富 N<sub>2</sub> 气体;(2) CO<sub>2</sub> 在上升过程中与浅层地下水发生交互作用,当表层地表水的环境发生了变化会使

CO<sub>2</sub> 溶于水的数量发生变化,因火山气体最主要成分 CO<sub>2</sub> 浓度降低,从而使另一主要成分 N<sub>2</sub> 浓度增加;(3) 来自浅层岩浆房的富 N<sub>2</sub> 气体增多了。

## 5 讨论

### 5.1 观察事实

2002 年 5 月份,聚龙温泉群 2 个泉点水温突然上升 2℃, 2 个月后天池火山进入“活跃时段”。2010 年 5 月份聚龙温泉群 2 个泉点水温再次同步突升 3℃;2010 年长白山北坡水准测量结果显示,2010 年各点位的垂直位移改变了原来每年上升 4mm 的规律,尤其是 P13 点相对 2009 年,其相对高程下降了 12.72mm。

### 5.2 对观察事实的解释

2002 年温泉水温度的升高对应了一个火山活跃时段, 2010 年 5 月份聚龙温泉群 2 个泉点水温再次同步突升 3℃, 然而迄今为止尚没有可以解释这种突升的火山地震事件发生,这是一个值得关注的异常。在聚龙温泉群水热活动发生的这 2 次水温突升事件期间,锦江温泉群和湖滨温泉群水温均未发生明显变化,这可能是由于这 3 个温泉群岩浆气体来源不同造成的,聚龙温泉下方存在浅部热储,逸出气体沿较浅的活动断裂向地表迁移释放,所以对温度的反应可能更直接更明显;2010 年长白山北坡水准测量结果显示,北坡垂直位移打破了长白山北坡锥体持续抬升的趋势,海拔最高的水准点相对 2009 年下降了 12.72mm,此现象应引起高度关注,有可能是火山活动由平静期再次转为活跃期的一个信号。长白山北坡火山锥体的下降异常是客观存在的事实,由于该异常才出现一年多时间,更详尽的解释应该通过以后几年的监测数据进行对比分析才能得到。

### 5.3 气体来源的分析

He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 三角图解能直观地反应火山区深部气体的迁移规律,2002~2005 年期间长白山温泉逸出气体 He-N<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 三角图解反应了幔源岩浆气体 He 值升高,说明此期间有可能岩浆房幔源补给加强。

## 6 结论

2010 年聚龙温泉泉水温度出现突升异常,2010 年北坡垂直位移的方向发生逆转异常,而且异常量达到正常年动态变化值的 3 倍,这 2 个客观存在的异常现象也许是长白山火山将进入新的活跃时段的前兆。火山活动进入活跃时段的标志是大量火山地震及震群的发生,幔源岩浆气体 He 含量大幅度上升,但现阶段长白山火山区还没有发生大量火山地震,He 含量也没有显示异常,因此,本文讨论的 2 个异常还

不足以作为长白山火山已经进入新的活跃时段的证据,应该密切关注火山地震和幔源气体含量的变化,才能得到更科学的判断。

**致谢** 吉林省地震局李克、刘俊清同志为本文提供了水准测量的数据;长白山火山监测站全体同仁共同参加了温泉逸出气体取样和温度测试工作,在此谨致谢忱!

## References

- Chiodini G, Brombach T, Caliro S and Cardellini C. 2002. Geochemical indicators of possible ongoing volcanic unrest at Nisyros Island (Greece). *Geophysical Research Letters*, 29 (16): 10.1029/2001GL014355
- Delaney P and McTigue DF. 1994. Volume of magma accumulation or withdrawal estimated from surface uplift or subsidence, with application to the 1960 collapse of Kilauea Volcano. *Bulletin of Volcanology*, 56: 417 - 424
- Dowden J, Kapadia P, Brown GC and Rymer H. 1991. Dynamics of a geyser eruption. *Journal of Geophysical Research*, 96: 18059 - 18071
- Dzurisin D, Poland MP and Bürgmann R. 2002. Steady subsidence of Medicine Lake volcano, northern California, revealed by repeated leveling surveys. *J. Geophys. Res.*, 107 (B12): doi: 10.1029/2001JB000893
- Guo LQ. 1990. Modern crustal vertical deformation in northeast China block region and meaning of tectonic activity. *Northeastern Seismological Research*, 6(3): 15 - 20 (in Chinese with English abstract)
- Lee HF, Yang TF, Lan TF *et al.* 2008. Temporal variations of gas compositions of fumaroles in the Tatun Volcano Group, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178: 624 - 635
- Li K, Liu JQ, Pan XD *et al.* 2009. Crust deformation monitoring and

research in Tianchi volcano area, Changbai mountains from 2000 ~ 2007. *Seismology and Geology*, 31(4): 639 - 646 (in Chinese with English abstract)

- Liu GM, Yang JK and Wang LJ. 2011. Analysis of Tianchi volcano in Changbai Mountain, NE China. *Global Geology*, 14(1): 44 - 53
- Liu MJ, Gu ML, Sun ZG, Wei HQ and Jin BL. 2004. The activity of major faults and the hydrothermal alteration zone at Tianchi volcano of Changbaishan. *Earthquake Research in China*, 18(3): 253 - 262
- Priatna and Kadarsetia E. 2007. Characteristics of volcanic gas correlated to the eruption activity: Case study in the Merapi Volcano, periods of 1990 ~ 1994. *Jurnal Geologi Indonesia*, 2(4): 235 - 246
- Rowe GL, Brantley SL, Fernandez JF and Borgia A. 1995. The chemical and hydrologic structure of Poa's Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 64: 233 - 267
- Rymer H, Cassidy J, Locke CA *et al.* 2000. Geophysical studies of the recent 15-year eruptive cycle at Poás Volcano, Costa Rica. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97: 425 - 452
- Shangguan ZG, Zhao CP, Gao L *et al.* 2006. Carbon isotopic compositions of the methane derived from magma at the active volcano regions in China. *Acta Petrologica Sinica*, 22(6): 1458 - 1464 (in Chinese with English abstract)
- Sigmundsson F and Vadon H. 1997. Massonnet, Readjustment of the Krafla spreading segment to crustal rifting measured by satellite radar interferometry. *Geophysical Research Letter*, 24: 1843 - 1846
- Wu JP, Ming YH, Fang LH and Wang WL. 2009. S-wave velocity structure beneath Changbaishan volcano inferred from receiver function. *Acta Seismologica Sinica*, 22(4): 409 - 416

## 附中文参考文献

- 郭良迁. 1990. 东北断块区的现代垂直形变及其构造活动的意义. *东北地震研究*, 6(3): 15 - 20
- 李克, 刘俊清, 盘晓东等. 2009. 2000 ~ 2007 年期间长白山天池火山地区地壳变形监测与分析. *地震地质*, 31(4): 639 - 646
- 上官志冠, 赵慈平, 高玲等. 2006. 中国活动火山区甲烷的碳同位素研究. *岩石学报*, 22(6): 1458 - 1464