



基于钻井温的长白山天池火山北坡浅部岩浆房赋存深度研究

钱 程,崔天日,唐 振,江 斌,张 超,陈会军,吴 桐

中国地质调查局 沈阳地质调查中心,辽宁 沈阳 110034

摘 要: 长白山火山区地壳热结构尚未建立,目前基于地球物理探测手段获得的天池火山浅部岩浆房赋存深度存在差异。通过对天池火山北坡 CZK07 钻孔测温情况的研究,在资料评价与地温梯度计算的基础上,结合全新世岩浆房温度资料,估算了北坡浅部岩浆房的赋存深度。CZK07 钻孔位于地球物理探测所推测的浅部岩浆房正上方,靠近历史时期火山喷发火口,在孔深约 610 m 处地温较高且稳定(102.5~106.8 °C)。连续测温资料显示,钻孔地温随深度呈一次正相关变化,地温梯度主要变化于 134~178 °C/km 之间(平均为 153 °C/km),可大致代表浅部岩浆房上覆地壳的地温梯度。基于前人浅部岩浆房的温度研究,本次定量估算的天池火山北坡浅部岩浆房的赋存深度,为天池水面下 5.25~7.21 km,与地球物理探测的反演结果相近。

关键词: 长白山天池火山;钻井温;浅部岩浆房;地温梯度

COVERED DEPTH OF SUPERFICIAL MAGMA CHAMBER ON THE NORTHERN SLOPE OF TIANCHI VOLCANO IN CHANGBAI MOUNTAIN BASED ON BOREHOLE TEMPERATURE

QIAN Cheng, CUI Tian-ri, TANG Zhen, JIANG Bin, ZHANG Chao, CHEN Hui-jun, WU Tong

Shenyang Center of China Geological Survey, Shenyang 110034, China

Abstract: The crustal thermal structure in Changbaishan volcanic area has not been established yet and there are differences about the covered depth of superficial magma chamber in Tianchi Volcano by means of geophysical exploration. The covered depth of superficial magma chamber on the northern slope of Tianchi Volcano is estimated through the temperature measurement of CZK07 borehole, data evaluation and geothermal gradient calculation, combined with the temperature data of Holocene magma chamber. The CZK07 borehole is located right above the superficial magma chamber speculated by geophysical exploration, close to the historic crater of volcanic eruption, with relatively high and stable temperature (102.5–106.8 °C) at the depth about 610 m. The continuous temperature measurement data indicates that the borehole temperature shows a positive correlation with depth, with the geothermal gradient ranging from 134 to 178 °C/km (averagely 153 °C/km), roughly representing the geothermal gradient of the overlying crust of superficial magma chamber. Based on previous temperature studies of superficial magma chamber, the covered depth of superficial magma chamber on the northern slope of Tianchi Volcano is estimated to be 5.25–7.21 km below the surface of Tianchi Lake, which is similar to the inversion results of geophysical exploration.

Key words: Tianchi Volcano in Changbai Mountain; borehole temperature; superficial magma chamber; geothermal gradient

收稿日期:2021-04-22;修回日期:2021-08-12. 编辑:张哲.

基金项目: 中国地震局吉林长白山火山国家野外科学观测研究站研究课题“天池火山造盾时期粗面岩年代格架与成因”(NORSCBS21-01);国土资源部公益性行业基金项目“长白山火山基础地质与环境地质研究”(201211095-5);中国地质调查局项目“全国陆域及海区地质图件更新与共享”(DD20190372).

作者简介: 钱程(1985—),男,硕士,高级工程师,主要从事区域地质与新构造研究,通信地址 辽宁省沈阳市皇姑区黄河北大街 280 号,E-mail//qch1985123@163.com

0 前言

长白山天池火山位于吉林省东部的中朝边境地区,晚新生代以来持续活动,为地球上最大的活火山之一^[1]。20 世纪 60 年代初,吉林地质调查局在长白山开展了 4 幅 1:20 万区域地质填图,初步揭开了长白山火山的神秘面纱;80 年代以来,学者们针对天池火山的成因、形成时代、岩浆作用、活动期次、喷发机制、火山灾害等进行了系统研究,取得了一系列的成果。在诸多研究工作中,天池火山岩浆系统的空间定位及活动性评估是判定火山活动未来走势与预警火山喷发等现实性问题的关键。目前,关于天池火山岩浆系统的探测工作主要围绕以下几个方面:1)通过火山岩岩石学研究,在天池火山之下建立了地幔(深部)和地壳(浅部)双层岩浆房结构模式^[2-5],并识别出地壳浅部两个独立岩浆房^[6];2)基于物理火山学分析,推测天池火山之下存在巨大的岩浆柱,在地壳、岩石圈地幔和下地幔中存在多个岩浆房^[7];3)利用大地电磁和深地震等地球物理探测,获得了长白山地区的地壳结构及地温结构特征,进而揭露其下伏岩浆房赋存特征^[8-17]。

学者们通过人工地震、火山地震和大地电磁等地球物理探测方法,将天池火山浅部岩浆房顶界面的赋存深度限制于天池偏北下方 5~15 km 范围。但根据不同方法解析所得到的具体深度不甚一致,主要有 12 km^[13]、8~9 km^[16]、5 km^[9]、7 km^[10]等,究其原因在于地球物理探测岩浆系统所成的影像具有局限性和多解性。也有学者利用天池火口及周边千年大爆发喷发物的地球化学和斑晶特征研究确定了火口之下碱流质和粗面质岩浆房的深度分别为 5 km 和 7~9 km^[6]。近年来,中国地质调查局沈阳地质调查中心在长白山天池火山及池北地区开展了 4 个以科学研究为目的科钻工程。其中 CZK07 钻孔位于天池北坡“U”形谷的南部地区,距天池北泄口 3~4 km,坐标为 128°03′39″ E、42°03′12″ N,海拔为 1 805 m,钻孔开孔倾角 90°,进尺 644.8 m,岩心长度 566.8 m,主要揭露了天池火山晚新生代以来的火山喷发物^[18]。该孔位位于地球物理探测所推测的浅部岩浆房正上方,靠近天池火山千年大喷发和气象站期碱流质火山喷发的火口,其井温测量所揭示的地温变化规律对于揭示区域地壳热结构、定位浅部岩浆房赋存特征、监测岩浆房动态信息等科学问题具有重要意义。钻孔测温资料显示,该井地温较高

且与井深呈线性相关关系,一定程度上反映了天池火山北坡浅部岩浆房上覆地壳的地温梯度及其变化特征。本文重点对该钻孔的测温情况进行报道,并在井温资料与地温梯度评价的基础上,结合前人全新世火山喷发物的岩浆温度研究,估算天池火山浅部岩浆房的赋存深度。

1 区域概况

长白山天池火山横跨中朝边境,整体呈现山地地貌,沟壑纵横,地形复杂,相对高差较大,其中心火山口分布较多,相互叠置、多期活动,并塌陷积水成湖,形成国内外知名的高山淡水湖——天池^[19]。区内水系发育,呈放射状,为鸭绿江、松花江和图们江的源区^[20]。大地构造位置上,该区属中朝古板块东北缘,新生代处于日本海弧后盆地和中国东北松辽断陷盆地之间的北北东向隆起区^[21-24],属西太平洋板块向欧亚板块俯冲的前缘地区,是环太平洋火山链和地震带的重要组成部分^[21-26]。晚新生代以来长白山火山活动强烈,相继经历了玄武质—粗面质—碱流质的演化过程^[2](图 1a)。围绕天池发育环状火山构造,并在天池外坡的锥体上发育放射状火山构造,控制沟谷及水系分布。天池火山形成于中新世玄武岩台地之上,相继形成了上新统军舰山组玄武岩,下更新统漫江组玄武岩、小白山组粗安—粗面质碎屑岩及熔岩、老房子小山组玄武岩,中—上更新统白头山组 I 段、II 段、III 段粗面岩及其碎屑岩,全新统冰场组火山泥石流、火山碎屑流和空降堆积,全新统白云峰组火山泥石流、熔岩流、火山碎屑流和空降堆积,全新统八卦庙组空降堆积和熔结凝灰岩(图 1b)。

2 井温测试与地温梯度计算

2.1 测温原理

对于 CZK07 钻孔的井温测量,使用了自制留点温度计升降设备。该设备是在方形铁架里固定铝合金汽车轮毂,轮毂轴两端用轴承固定,再把直径 1 mm、长约 700 m 的镀锌油丝绳缠绕在轮毂凹槽里,在油丝绳的尾端绑定 1.5 kg 左右的重锤,而后自尾端开始每隔 50 m 绑定 1 个铜套留点温度计,共计 12 个。测温时,首先固定方形铁架及汽车轮毂,使尾端绑定重锤的油丝绳缓慢匀速送往钻孔,保证油丝绳撑开拉直,以减少

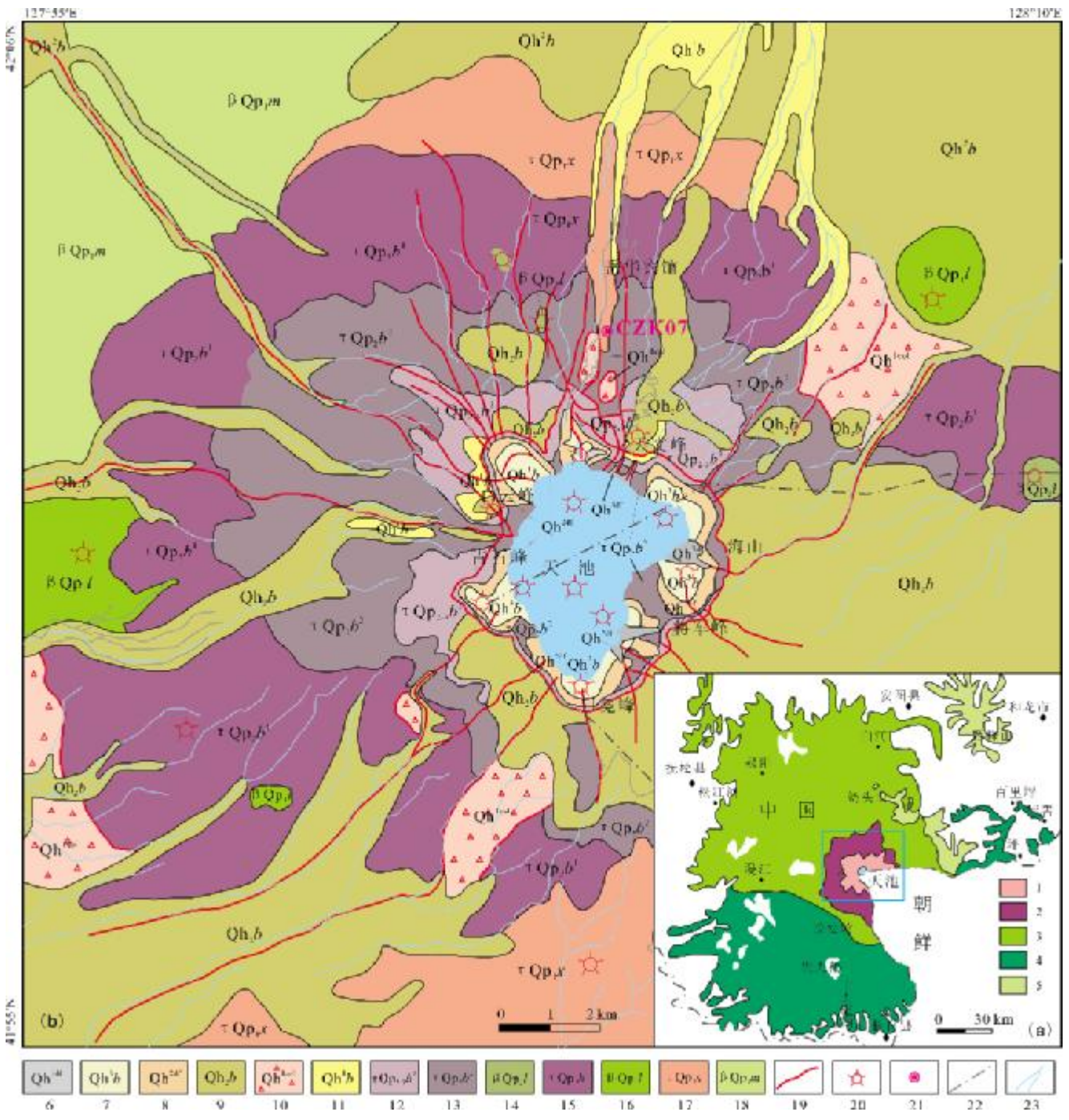


图 1 长白山天池地区地质图

Fig. 1 Geological map of Tianchi Volcano in Changbai Mountain

a—长白山火山地质简图 (据文献 [3,27]) (volcanic geological sketch map of Changbai Mountain, from References [3, 27]); b—天池火山地质图 (geological map of Tianchi Volcano); 1—第四纪火山碎屑岩 (Quaternary pyroclastic rock); 2—第四纪粗面岩 (Quaternary trachyte); 3—第四纪玄武岩 (Quaternary basalt); 4—上新世玄武岩 (Pliocene basalt); 5—中新世玄武岩 (Miocene basalt); 6—天池内壁晚期泥石流、滑坡体 (later debris flow and landslide mass on the inner wall of Tianchi crater); 7—八卦庙组 (Baguamiao fm.); 8—天池内壁早期泥石流、滑坡体 (earlier debris flow and landslide mass on the inner wall of Tianchi crater); 9—白云峰组 (Baiyunfeng fm.); 10—大型滑坡体 (large landslide mass); 11—冰场组 (Bingchang fm.); 12—白头山组Ⅲ段 (3rd mem. of Baitoushan fm.); 13—白头山组Ⅱ段 (2nd mem. of Baitoushan fm.); 14—老虎洞组 (Laohudong fm.); 15—白头山组Ⅰ段 (1st mem. of Baitoushan fm.); 16—老房子小山组 (Laofangzixiaoshan fm.); 17—小白山组 (Xiaobaishan fm.); 18—漫江组 (Manjiang fm.); 19—放射、环状断裂 (radial and ring fault); 20—火山口 (crater); 21—钻孔位置 (borehole location); 22—国界 (national border); 23—水系 (water system)

飞轮抖动对测温结果的影响,待重锤落底后,等待 30~60 min 后,缓慢匀速提升油丝绳,待铜套留点温度计到达地表后迅速卸载,观测其内留点温度,并记录.测温过程采用铜套留点温度计的好处在于其内水银柱指示的位置不随周围温度的下降而下降,保留在曾经达到过的最高点,此外铜套对留点温度计也起到良好的保护作用,本次测温使用的是江苏省常州市瑞明仪表厂生产的铜套留点温度计,温度测量范围 0~150 ℃.

2.2 井温资料

CZK07 钻孔的井温资料主要来源于系统测温数据.一般而言,系统测温数据是在完井之后静井 4~7 d 甚至数月后进行地温测井时获得的地温数据.由于静井时间长,井温和地温近于平衡,这类数据可以反映地层地温^[27]. CZK07 钻孔于 2013 年 5 月中旬完井,于 2013 年 6 月中下旬开展了 7 次系统测温工作,测温结果见表 1. 多次测温结果显示,孔深 600 m 以上的测温结果较高且一致(102.5~106.8 ℃),且地温随深度呈一次正相关变化(图 2a),个别测温数据显示温度异常,但不影响测温数据的整体相关性特征.

2.3 地温梯度计算

首先确定恒温带的深度和温度. 本研究中,恒温层的深度定位为 50~100 m 间的第一个测点深度(D_0),温度 T_0 即为其测点的温度. 如某一深度 D_n 点的地温为 T_n , 则该点的地温梯度 $G=(T_n-T_0)/(D_n-D_0)$. 在数据处理时,以当天的测温记录为基础,将不同深度温度值计算出的地温梯度加以算数平均,即为其当天的平均地温梯度,多天测温得到的地温梯度的平均值即为该井的平均地温梯度. 根据以上数据处理过程,得到 CZK07 钻孔的地温梯度与深度关系图(图 2b).

1) 6 月 14 日的两次测温的地温梯度较为稳定且一致,分别为 11.0~16.8 ℃/100 m 和 13.4~16.7 ℃/100 m,平均地温梯度均为 15.0 ℃/100 m.

2) 其他各次测温的地温梯度变化范围较大,6 月 21 日测温的地温梯度为 16.0~24.1 ℃/100 m,6 月 23 日两次测温的地温梯度为 13.7~25.6、12.4~23.0 ℃/100 m,6 月 30 日两次测温的地温梯度为 19.4~22.9、15.0~23.2 ℃/100 m. 3 天的平均地温梯度分别为 19.9 ℃/100 m、19.2 ℃/100 m 和 18.5 ℃/100 m,加权平均为 19.2 ℃/100 m.

3) 7 次测温的地温梯度整体变化于 11.0~25.6 ℃/

表 1 2013 年 6 月 CZK07 孔井温记录表
Table 1 Records of temperatures vs. depths in CZK07 borehole in June 2013

14 日			21 日		23 日			30 日		
深度/m	温度 1/℃	温度 2/℃	深度/m	温度/℃	深度/m	温度 1/℃	温度 2/℃	深度/m	温度 1/℃	温度 2/℃
610	102.5	104	525	100.2	613	98.9	106.8	550		97.3
560	97.12	96.1	475	85.6	563	80.6		500		91.3
510	95	94.2	425	83.6	513	118	92.1	450		77.2
460	86.9	86.6	375	118	463	72.2	77.2	400		76.2
410	85.8	85.6	325	76.2	413	79.4	79.3	350		68.7
360	74.2	74	275	68.5	363	77.6	76.8	300	74.4	68.2
310	69.5	69.2	225	57.1	313	69.8		250	62.7	55.6
260	62.5	62.3	175	45.6	263	59.1		200	47.1	51.9
210	51.5	49.7	125	32.8	213	50.6		150	36.6	
160	44.5	44.1	75	21.5	163		35.2	100	26.8	
110	34	37			113		18.4	50	17.1	
60	28.5	29			63		12.2	0	13.9	

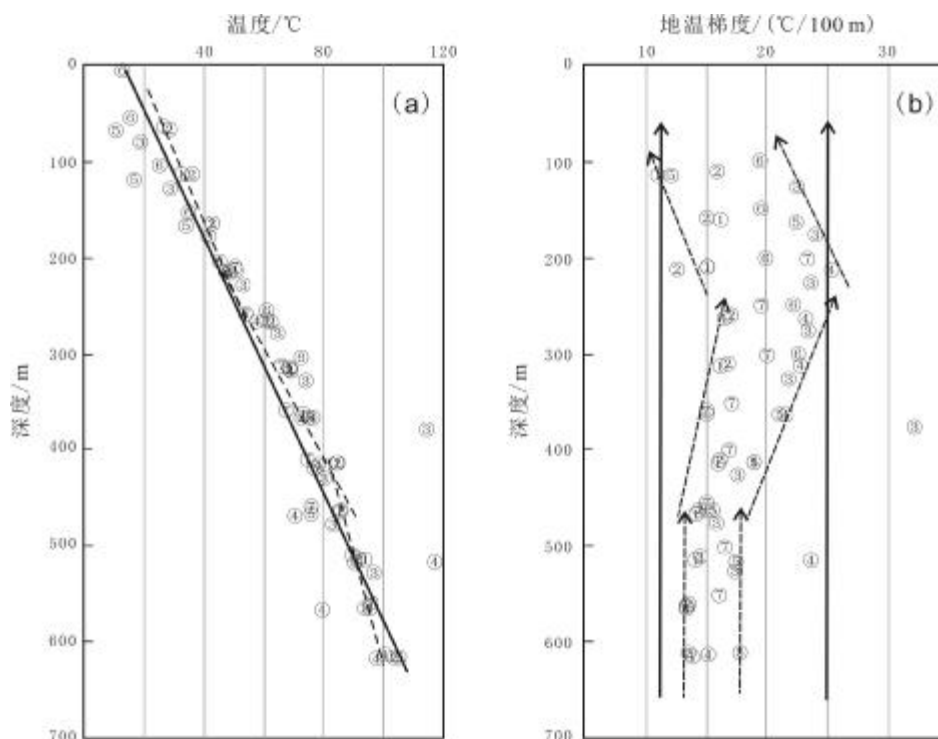


图2 CZK07 钻孔井温-深度图和地温梯度-深度图

Fig. 2 Diagrams of temperature vs. depth and geothermal gradient vs. depth in CZK07 borehole

①—6月14日一次测温(1st measurement on June 14); ②—6月14日二次测温(second measurement on June 14); ③—6月21日测温(temperature on June 21); ④—6月23日一次测温(1st measurement on June 23); ⑤—6月23日二次测温(second measurement on June 23); ⑥—6月30日一次测温(1st measurement on June 30); ⑦—6月30日二次测温(second measurement on June 30)

100 m, 平均值为 $17.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 但各段具有明显的变化趋势, 主体呈3段式特征: 孔深大于450 m的地温梯度较为稳定, 变化于 $13.4\sim 17.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (平均值为 $15.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$); 孔深由450~50 m地温梯度呈增大趋势, 由 $14.4\sim 16.3$ 增至 $16.7\sim 23.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 平均值由 15.3 增至 $20.4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; 孔深由250~100 m地温梯度呈减小趋势, 由 $16.7\sim 23.3$ 减至 $11.0\sim 19.4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 平均值由 20.4 减至 $14.7\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (图3b)。

就单日测温而言, 6月14日较为稳定, 地温梯度平均值为 $15.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 其他日期变化较大, 地温梯度平均值较高, 变化于 $18.5\sim 19.9\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 之间。总体变化趋势上, 由浅部(孔深100 m)—中上部(孔深250 m)—中下部(孔深450 m)—下部(孔深大于450 m), 地温梯度具有增大、再减小、而后稳定的趋势, 平均值由 $14.7\sim 20.4\sim 15.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 而后稳定, 变化幅度由大变小。考虑到孔深450 m以下的稳定地温梯度与6月14日较为稳定的单日情况, 笔者认为 CZK07 钻孔的地温梯度主要变化于 $13.4\sim 17.8\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, 加权平均值

为 $15.3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 。

3 浅部岩浆房定位与单井测温数据评价

3.1 浅部岩浆房地面投影定位

四平—长白山—日本地震层析剖面图显示, 断面上呈现两个异常地质体, 一个是从日本深海沟向西倾斜的低温高速带(正异常), 另一个为长白山火山区向东南方向深部延伸的高温低速带(负异常)^[28]。基于长白山火山区下部向深部延伸的高温低速带特征, 学者提出了长白山火山岩浆柱, 认为该岩浆柱是一个总体呈串珠状排列的层状富岩浆集合体, 地壳部分存在数个高温低速囊状体, 且在地壳浅部埋藏若干高温囊状体^[7], 该认识得到了火山岩石学研究的佐证。小震精定位和地表形变反演表明, 在天池火山地下约5 km存在一个岩浆房^[29-30], 这一深度与普遍认为的碱流质岩浆的贮存深度相一致^[31]。朝鲜一侧的地震观测数据计算得到在天池火山地下5~10 km的范围内存在明显的低速异常, 峰值出现在8 km左右深度, 推测此低

速异常带为岩浆的贮存区域^[32]。Jiang et al.^[33]基于天池火山周边的 4 个深井热流数据对长白山火山的热结构进行研究,认为天池破火山口附近的热流量值最高,并向周边递减,在超出深地震成像的地壳岩浆房区降低至正常热流,并由此推测天池岩浆系统是一个以天池火山口为中心的深度为 8~14 km 的椭圆形岩浆房,其东西轴约 20 km、南北轴约 70 km。上述研究成果显示,天池火山的下伏地壳中蕴含了若干垂向上和横向上断续分布的地球物理异常囊状体,分布于天池破火山口周边地区。

长白山火山及周边的三维深地震测深研究显示,在天池地壳浅部深度小于 8~9 km 范围内,岩浆囊的分布范围小,集中分布在天池火山口稍北的南北方向上,4 km、6 km、8 km 深度的 P 波慢度扰动影像显示在天池火山北坡存在一潜伏的环状构造,其内存在若干低速囊状体,最为显著的位于瀑布-导站地区^[16]。长白山地区的大地电磁测深结果显示,天池火山口及附近的电性结构呈现三维异常体特征,异常体埋深 12 km (浅部岩浆囊),其中 4 个显著的低阻体分别位于长白山锦江温泉、聚龙泉温泉、长白山北山门和双目峰附近,大体代表了浅部岩浆房顶部的潜伏高温体^[13]。南北向横穿天池的二维大地电磁测深剖面揭示了剖面深部的电性结构,结果显示天池火山口下方存在明显的直立型岩浆通道,在火山口下方往北方向附近,在埋深位置约 7 km 深处存在一个明显的低阻异常体,与天池火山口下方的岩浆通道对接,推测其可能是地表浅部发育的岩浆囊^[10]。也有学者详细调查了天池火口及周边千年大爆发喷发物的序列与分布,并基于碱流质和粗面质火山喷发物的地球化学和斑晶特征确定了火口之下地壳浅部的两个独立的岩浆房,模拟结果显示碱流质岩浆房位于天池火口偏北方向(深度为 5 km),粗面质岩浆房位于天池火口正下方(深度为 7~9 km)^[6]。这些研究结果推测的天池火山浅部岩浆房地面投影位置主要分布于天池破火山口偏北地区,大体与天池火山区温泉群的分布(瀑布-导站)^[34]及全新世气象站期碱流质火山活动定位^[35-36]一致。由此推测,天池火山口偏北方向地球物理探测的异常囊状体可大致定位天池火山浅部岩浆系统的分布,其中特征最为显著的即为天池火山北坡瀑布-导站地段下部的三维异常体。而本研究中的 CZK07 钻孔位于瀑布至导站的中部位

置,即位于浅部岩浆房的正上方。

3.2 单井测温数据评价与热储的地温影响

基于断层控制的花岗岩类侵入体固结过程研究,获得了浅层(5~15 km)侵入体的热演化过程,侵入体岩浆囊形态随时间发生变化,热力学结果显示,岩浆囊在成形后向下封闭、向上具有极高的热流值,同时出现两侧不对称的特征,且远离岩浆囊横向上的地温梯度陡然变小且稳定^[37]。模式图显示,岩浆囊顶覆地壳的地温梯度可达 80~200 °C/km,且靠近岩浆囊呈变大趋势,而横向远离岩浆囊地区地温梯度稳定,约为 25~30 °C/km。Silva 等^[38]认为世界上火山区地下的地温梯度主要变化于 30~50 °C/km,并模拟了地温梯度为 30 °C/km 和 50 °C/km 的浅部岩浆储层热结构,两个结果显示浅部大型岩浆储层上覆地壳的地温梯度均为 160 °C/km 左右,该值主要受浅部岩浆囊状体的顶面深度控制。据天池火山南北方向的大地电磁剖面特征^[10,13],火山之下的地壳浅部显著低阻囊状体位于天池破火山口北部,低阻囊状体顶部电阻率增大至中等,上覆地壳的电阻率较为稳定,横向上囊状体两侧电阻率等值线密度不对称,远离囊状体浅部地壳具有高阻特征,相似于上文其他学者模拟的岩浆囊热力场。

长白山地区用于商业温泉开发的钻井较多,主要分布在天池火山北腹地的二道白河镇地区和西腹地的抚松县松江河地区,地温梯度大体分布于 10~30 °C/km。而在天池火山锥体上的钻孔较少,仅有的几个钻孔零星分布在天池火山北坡,包括飞狐山庄钻孔(深度 155 m)、二道白河长白山保护局钻孔(深度 150 m)、大宇饭店钻孔(深度 427 m)和双目峰钻孔(深度 98 m)^[39],还有北山门东侧的浮石林峡谷钻孔(编号 CZK06,深度 402 m)及文本讨论的 CZK07 钻孔。钻孔测温资料的报道也较少。Jiang et al.^[33]报道了包括 CZK07 在内的 4 个钻井井位的地温梯度,其中天池火山锥体周边台地上钻孔的地温梯度为 28~29 °C/km,而天池火山锥体边部钻孔的地温梯度为 30~49 °C/km。笔者获得浮石林峡谷 CZK06 钻孔的地温梯度约为 35 °C/km。结合上述区域地球物理探测和地温资料,可推测天池火山的地温场与世界上其他火山区相似,浅部岩浆囊正上部地壳的地温梯度较高,达到 150 °C/km 以上,靠近岩浆囊地壳的地温梯度急剧变小,约为 30~50 °C/km,远离岩浆囊地壳的地温梯度稳定变小,约为 10~30 °C/km。

CZK07 钻孔位于浅部岩浆房的正上方,地温梯度主体变化于 134~178 °C/km,平均为 153 °C/km,与火山区浅部岩浆房上覆地壳的地温梯度一致。由此判断 CZK07 钻孔单井测温数据可较好地反映天池火山浅部岩浆房上覆地壳的地温场特征。

天池火山锥体上的温泉主要有天池破火山口北部的湖滨温泉、北坡瀑布-导站的北坡温泉群(包括聚龙泉)、西坡锦江峡谷上部的锦江温泉群,这些温泉的最高水温可达 80 °C 左右。上官志冠等^[34]对这些温泉地热区逸出气体的物质来源进行了研究,认为这些地热水源于大气降水,与水热活动伴生的深源气体释放强度不高,少量深源气体也并非是现代上地幔活动岩浆侵入所致,而是来自历史上火山喷发活动遗留的幔源岩浆残留体。Jiang et al.^[33]所获得的 4 个钻孔地温梯度在孔深 300~460 m、330~1360 m、330~880 m 地温较高且稳定,呈现较低的地温梯度。由此推测,天池火山区地热水可能主要来源于与地表水有关的浅层地下水,其热源可能主要是浅部岩浆房及上覆地壳较高的地热梯度。就 CZK07 钻孔井温和地温梯度与井深的关系而言,在钻孔中上段(450 m 以内)呈现波动,主要表现为两个方面:1)由浅部(孔深 100 m)—中上部(孔深 250 m)—中下部(孔深 450 m),地温梯度具有增大、再减小、而后稳定的趋势;2)地温梯度最高值出现在孔深 250~350 m 处,可达 200 °C/km,地温约为 60~80 °C(图 2)。250~450 m 的深度范围及 60~80 °C 的地温与北坡温泉群的热储深度及温度相近,较高的地温梯度出现在热储偏上层位,且在孔深 300 m 以内地温梯度的变化范围较大,这些现象的出现可能均为浅层稳定热储层与地表水热交换的结果。因而推测,北坡温泉群热储对 CZK07 钻孔井温的影响范围应在孔深 450 m 范围内,影响的结果使得孔深 250~350 m 地温梯度升高,而整个钻孔的地温梯度平均值和 450 m 以下的稳定地温梯度,尤其是后者(134~178 °C/km,加权平均值为 153 °C/km)可大致代表 CZK07 钻孔位置浅部地壳的地温梯度。

4 岩浆房深度估算

岩浆房深度海拔(H ,单位为 km)的估算主要基于全新世岩浆温度(T ,单位为 °C)和地温梯度(G ,单位

为 °C/km)计算而得,即 $H=H_0-T/G$ (H_0 为计算地的海拔高度,即 1.805 km)。

前人基于火山岩岩相学和岩石地球化学对天池火山全新世岩浆温度进行了大量研究。李霓等^[40]通过天池火山全新世 3 期浮岩长石斑晶中熔体包裹体的高温热台实验研究认为:第 1 喷发期岩浆均一温度在 938~1 014 °C 之间;千年大喷发期(第 2 喷发期)均一温度位于两个区间,分别是 850~926 °C 和 1 005~1 024 °C 之间;第 3 喷发期岩浆均一温度在 974~1 062 °C 之间。金伯禄等^[41]通过天池火山区的岩石地球化学研究,认为全新世碱流质岩浆的温度为 1 070 °C。潘波等^[6]对千年大喷发碱流质喷发阶段和粗面质喷发阶段的喷发物进行微量元素和斑晶特征研究,认为两阶段的岩浆来自两个独立的岩浆房,岩浆房平衡温度分别为 743 °C 和 862 °C。综合以上认识,笔者推测天池火山浅部(碱流质)岩浆房的岩浆温度为 750~1 050 °C 之间。

地温梯度与岩石的导热系数存在密切相关,而导热系数除受岩石的孔隙度和含水率控制外,与岩石的岩性关系最为密切。长白山晚新生代火山岩区的基底岩石出露主要为前寒武纪变质岩系(原岩主要为火山岩和深成侵入体)、晚三叠世钙碱性流纹质火山岩、晚侏罗世钙碱性安山质火山岩和早白垩世花岗岩^①。以上各种岩石与钻孔揭露的晚新生代火山岩(主要为熔岩和熔结凝灰岩)的孔隙度和含水率较为一致,且受岩性控制的导热差异也较小^[42],因此初步认为钻孔岩心的导热系数与钻孔之下的岩石导热系数一致,进而推测天池火山北坡 CZK07 钻孔之下的地温梯度为 153 °C/km(主要变化范围为 134~178 °C/km)。

根据上述计算公式和诸多学者对全新世天池火山岩浆房温度的估测结果,计算的岩浆房赋存深度见表 2。

Xu et al.^[9]通过 2002—2003 年火山地震推测火山震源深度为天池下方 5 km;仇根根等^[10]根据大地电磁研究显示天池火山北坡低阻异常体的深度为天池下方 7 km;张先康等^[16]利用低 P 波速度反演出天池火山的地壳岩浆房浅部顶面深度约 8~9 km。本研究基于 CZK07 钻孔井温资料,估算天池火山北坡的浅部岩浆房深度海拔为 -3.10~ -5.06 km,若以天池水面为基本高程(海拔为 2.15 km),那么浅部岩浆房深度为 5.25~

① 吉林省地质调查院. 1:250 000 和龙市、长白朝鲜族自治县区域地质调查报告. 2004.

表 2 天池火山北坡浅部岩浆房深度计算

Table 2 Covered depth of superficial magma chamber on the northern slope of Tianchi Volcano

测试或计算办法	喷发期	测试温度/℃	岩浆房海拔高程/km	资源来源
包裹体岩浆均一温度	第 1 期	938~1 014	-4.33~-4.82	文献[40]
	第 2 期	850~926	-3.75~-4.25	
		1005~1 024	-4.76~-4.89	
		974~1 062	-4.56~-5.14	
岩石化学计算温度	未分	1070	-5.19	文献[41]
长石-火山玻璃平衡温度计	千年大喷发	718~786	-2.90~-3.34	文献[6]

7.21 km,与上述地球物理探测的反演结果相近.

5 结论

天池火山北坡的 CZK07 钻孔井温测量结果显示,在孔深 610~613 m 地温较高且稳定(102.5~106.8 ℃),地温随深度呈一次正相关变化,地温梯度主要变化于 134~178 ℃/km 之间,加权平均值为 153 ℃/km,可大致代表天池火山北坡浅部岩浆房上覆地壳的地温梯度.基于岩石学研究推测的天池火山浅部(碱流质)岩浆房的温度(750~1 050 ℃),定量估算了天池火山北坡浅部岩浆房的赋存深度海拔为-3.10~ -5.06 km,若以天池水面为基本高程,那么浅部岩浆房深度为 5.25~7.21 km,与地球物理探测反演所得到的认识近一致.

此外,本钻孔及天池火山口周边其他深钻的井温长期监测,不仅可以定量估算浅部岩浆系统的赋存状态,而且可以直观、及时地反映地下岩浆房的活动特征,为火山预报及火山灾害预警提供重要的技术支撑.

参考文献(References):

[1]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[J].地球物理学报,1992,35(5): 661~665.
Liu R X, Li J T, Wei H Q, et al. Volcano at Tianchi Lake, Changbaishan Mt.: A modern volcano with potential danger of eruption [J]. Acta Geophysica Sinica, 1992, 35(5): 661~665.
[2]刘若新,魏海泉,李继泰.长白山天池火山近代喷发[M].北京:科学出版社,1998: 1~157.
Liu R X, Wei H Q, Li J T. Changbai Mountain Tianchi volcano eruption in modern times[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1~157. (in Chinese)

[3]樊祺诚,隋建立,王团华,等.长白山天池火山粗面玄武岩的喷发历史与演化[J].岩石学报,2006,22(6): 1449~1457.
Fan Q C, Sui J L, Wang T H, et al. Eruption history and magma evolution of the trachybasalt in the Tianchi volcano, Changbaishan[J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22(6): 1449~1457.
[4]樊祺诚,隋建立,王团华,等.长白山火山活动历史、岩浆演化与喷发机制探讨[J].高校地质学报,2007,13(2): 175~190.
Fan Q C, Sui J L, Wang T H, et al. History of volcanic activity, magma evolution and eruptive mechanisms of the Changbai volcanic province[J]. Geological Journal of China Universities, 2007, 13(2): 175~190.
[5]樊祺诚.长白山火山的历史与演化[J].资源调查与环境,2008,29(3): 196~203.
Fan Q C. History and evolution of Changbaishan volcano[J]. Resources Survey & Environment, 2008, 29(3): 196~203.
[6]潘波,樊祺诚,许建东,等.长白山天池火山千年大喷发的岩浆过程[J].岩石学报,2017,33(1): 163~172.
Pan B, Fan Q C, Xu J D, et al. Magmatic processes of the Millennium eruption at Changbaishan Tianchi volcano, China/North Korea [J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(1): 163~172.
[7]魏海泉.长白山火山岩浆柱岩浆上升作用过程[J].地学前缘,2010,17(1): 11~23.
Wei H Q. Magma up-moving process within the magma prism beneath the Changbaishan volcanoes [J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(1): 11~23.
[8]Hetland E A, Wu F T, Song J L. Crustal structure in the Changbaishan volcanic area, China, determined by modeling receiver functions[J]. Tectonophysics, 2004, 386(3/4): 157~175.
[9]Xu J D, Liu G M, Wu J P, et al. Recent unrest of Changbaishan volcano, Northeast China: A precursor of a future eruption? [J]. Geophysical Research Letters, 2012, 39(16): L16305.
[10]仇根根,裴发根,方慧,等.长白山天池火山岩浆系统分析[J].地球物理学报,2014,57(10): 3466~3477.
Qiu G G, Pei F G, Fang H, et al. Analysis of magma chamber at the

- Tianchi volcano area in Changbai Mountain[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(10): 3466–3477.
- [11]段永红, 张先康, 刘志, 等. 长白山-镜泊湖火山区地壳结构接收函数研究[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(2): 352–358.
- Duan Y H, Zhang X K, Liu Z, et al. A study on crustal structures of Changbaishan-Jingpohu volcanic area using receiver functions [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(2): 352–358.
- [12]刘志, 张先康, 王夫运, 等. 用地震走时反演计算长白山天池火山区二维地壳泊松比[J]. *地震学报*, 2005, 27(3): 324–331.
- Liu Z, Zhang X K, Wang F Y, et al. 2-D crustal Poisson's ratio from seismic travel time inversion in Changbaishan Tianchi volcanic region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2005, 27(3): 324–331.
- [13]汤吉, 邓前辉, 赵国泽, 等. 长白山天池火山区电性结构和岩浆系统[J]. *地震地质*, 2001, 23(2): 191–200.
- Tang J, Deng Q H, Zhao G Z, et al. Electric conductivity and magma chamber at the Tianchi volcano area in Changbaishan Mountain[J]. *Seismology and Geology*, 2001, 23(2): 191–200.
- [14]汤吉, 赵国泽, 王继军, 等. 基于地下电性结构探讨中国东北活动火山形成机制[J]. *岩石学报*, 2006, 22(6): 1503–1510.
- Tang J, Zhao G Z, Wang J J, et al. Study of the formation mechanism for volcanism in Northeast China based on deep electric structure[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(6): 1503–1510.
- [15]杨卓欣, 张先康, 赵金仁, 等. 长白山天池火山区三维地壳结构层析成像[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 107–115.
- Yang Z X, Zhang X K, Zhao J R, et al. Tomographic imaging of 3-D crustal structure beneath Changbaishan-Tianchi volcano region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 107–115.
- [16]张先康, 张成科, 赵金仁, 等. 长白山天池火山区岩浆系统深部结构的深地震测深研究[J]. *地震学报*, 2002, 24(2): 135–143.
- Zhang X K, Zhang C K, Zhao J R, et al. Deep seismic sounding investigation into the deep structure of the magma system in Changbaishan-Tianchi volcanic region[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 2002, 24(2): 135–143.
- [17]赵大鹏, 雷建设, 唐荣余. 中国东北长白山火山的起源: 地震层析成像证据[J]. *科学通报*, 2004, 49(14): 1439–1446.
- Zhao D P, Lei J S, Tang R Y. Origin of the Changbai intraplate volcanism in Northeast China: Evidence from seismic tomography[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(13): 1401–1408.
- [18]崔天日, 钱程, 江斌, 等. 长白山天池火山 CZK07 钻所揭示的火山地层层序和火山作用特征[J]. *地质学报*, 2017, 91(11): 2409–2422.
- Cui T R, Qian C, Jiang B, et al. Volcanic stratigraphic sequence and volcanism revealed by CZK07 drill core at Tianchi volcano, Changbai Mountain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(11): 2409–2422.
- [19]钱程, 崔天日, 江斌, 等. 长白山地区晚新生代火山地貌形态研究及其地质应用[J]. *第四纪研究*, 2014, 34(2): 312–324.
- Qian C, Cui T R, Jiang B, et al. A study on the characteristics of Late Cenozoic volcanic terrain in Changbaishan Mountain and its geological application[J]. *Quaternary Sciences*, 2014, 34(2): 312–324.
- [20]张丽红, 刘永顺, 彭年, 等. 长白山火山区放射状水系分形特征研究[J]. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 2011, 32(3): 83–88.
- Zhang L H, Liu Y S, Peng N, et al. Researches of fractal features of radial river system in the Changbaishan volcanic area[J]. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 2011, 32(3): 83–88.
- [21]Liu J Q, Han J T, Fyfe W S. Cenozoic episodic volcanism and continental rifting in Northeast China and possible link to Japan Sea development as revealed from K-Ar geochronology[J]. *Tectonophysics*, 2001, 339(3/4): 385–401.
- [22]Liu J Q, Chen S S, Guo Z F, et al. Geological background and geodynamic mechanism of Mt. Changbai volcanoes on the China-Korea border[J]. *Lithos*, 2015, 236–237: 46–73.
- [23]Wang Y, Li C F, Wei H Q, et al. Late Pliocene-recent tectonic setting for the Tianchi volcanic zone, Changbai Mountains, Northeast China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2003, 21(10): 1159–1170.
- [24]Zhang M L, Guo Z F, Cheng Z H, et al. Late Cenozoic intraplate volcanism in Changbai volcanic field, on the border of China and North Korea: Insights into deep subduction of the Pacific slab and intraplate volcanism[J]. *Journal of the Geological Society*, 2015, 172(5): 648–663.
- [25]Zhang M L, Guo Z F, Liu J Q, et al. The intraplate Changbaishan volcanic field (China/North Korea): A review on eruptive history, magma genesis, geodynamic significance, recent dynamics and potential hazards[J]. *Earth-Science Reviews*, 2018, 187: 19–52.
- [26]Tang Y C, Obayashi M, Niu F L, et al. Changbaishan volcanism in Northeast China linked to subduction-induced mantle upwelling[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7(6): 470–475.
- [27]郭文峰, 刘嘉麒, 郭正府. 长白山上新世以来玄武岩成分演变规律及其成因[J]. *岩石学报*, 2014, 30(12): 3595–3611.
- Guo W F, Liu J Q, Guo Z F. Temporal variations and petrogenetic implications in Changbai basaltic rocks since the Pliocene[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(12): 3595–3611.
- [28]邵济安, 刘福田, 陈辉, 等. 大兴安岭-燕山晚中生代岩浆活动与俯冲作用关系[J]. *地质学报*, 2001, 75(1): 56–63.
- Shao J A, Liu F T, Chen H, et al. Relationship between Mesozoic magmatism and subduction in Da Hinggan-Yanshan area [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2001, 75(1): 56–63.
- [29]胡亚轩, 王庆良, 崔笃信, 等. Mogi 模型在长白山天池火山区的应用[J]. *地震地质*, 2007, 29(1): 144–151.
- Hu Y X, Wang Q L, Cui D X, et al. Application of Mogi model at Changbaishan Tianchi volcano[J]. *Seismology and Geology*, 2007, 29(1): 144–151.

- [30] 吴建平, 明跃红, 张恒荣, 等. 长白山天池火山区的震群活动研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(4): 1089–1096.
- Wu J P, Ming Y H, Zhang H R, et al. Earthquake swarm activity in Changbaishan Tianchi volcano[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2007, 50(4): 1089–1096.
- [31] Castro J M, Dingwell D B. Rapid ascent of rhyolitic magma at Chaitén volcano, Chile[J]. Nature, 2009, 461(7265): 780–783.
- [32] Kyong-Song R, Hammond J O S, Chol-Nam K, et al. Evidence for partial melt in the crust beneath Mt. Paektu (Changbaishan), Democratic People's Republic of Korea and China[J]. Science Advances, 2016, 2(4): e1501513.
- [33] Jiang G Z, Hu S B, Cui T R, et al. Thermal structure beneath the Mt. Changbai volcanic area, northeastern Asia[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2021.
- [34] 上官志冠, 郑雅琴, 董继川. 长白山天池火山地热区逸出气体的物质来源[J]. 中国科学: D 辑地球科学, 1997, 27(4): 318–324.
- Shangguan Z G, Zheng Y Q, Dong J C. Material sources of escaped gases from Tianchi volcanic geothermal area, Changbai Mountains[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 1997, 40(4): 390–397.
- [35] 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[J]. 地质论评, 1999, 45(S1): 272–277.
- Li N, Liu R X, Wei H Q, et al. Study of modern erupted lava-pyroclastic flow of Qixiangzhan Formation of Tianchi volcano, Changbai Mountains[J]. Geological Review, 1999, 45(S1): 272–277.
- [36] 潘波, 樊祺诚, 仲广培, 等. 长白山天池火山气象站期喷发类型研究[J]. 地震地质, 2013, 35(3): 542–552.
- Pan B, Fan Q C, Zhong G P, et al. A discussion on the type of the Qixiangzhan eruption of Changbaishan Tianchi volcano, Northeast China[J]. Seismology and Geology, 2013, 35(3): 542–552.
- [37] Yoshinobu A S, Okaya D A, Paterson S R. Modeling the thermal evolution of fault-controlled magma emplacement models: Implications for the solidification of granitoid plutons[J]. Journal of Structural Geology, 1998, 20(9/10): 1205–1218.
- [38] De Silva S L, Gregg P M. Thermomechanical feedbacks in magmatic systems: Implications for growth, longevity, and evolution of large caldera-forming magma reservoirs and their supereruptions[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 2014, 282: 77–91.
- [39] 刘强, 盘晓东, 魏海泉, 等. 长白山天池火山喷发序列研究[J]. 中国地震, 2008, 24(3): 235–246.
- Liu Q, Pan X D, Wei H Q, et al. A borehole study on the eruptive sequence from the Tianchi volcano, Changbai Mountain[J]. Earthquake Research in China, 2008, 24(3): 235–246.
- [40] 李霓, Métrich N, 樊祺诚. 长白山天池火山全新世 3 期浮岩长石斑晶中熔体包裹体高温热台实验研究[J]. 地震地质, 2007, 29(3): 459–469.
- Li N, Métrich N, Fan Q C. Heating stage experiments of melt inclusions in feldspars of pumice from three eruptions of Changbaishan Tianchi volcano in Holocene[J]. Seismology and Geology, 2007, 29(3): 459–469.
- [41] 金伯禄, 张希友. 长白山火山地质研究[M]. 延吉: 东北朝鲜民族教育出版社, 1994: 1–223.
- Jin B L, Zhang X Y. Research on the volcanic geology in Mount Changbai [M]. Yanji: Northeast China Korean Nation Education Publishing House, 1994: 1–223. (in Chinese)
- [42] 许模, 王迪, 蒋良文, 等. 岩土体导热系数研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2011, 33(4): 421–427, 433.
- Xu M, Wang D, Jiang L W, et al. Review on thermal conductivity coefficient of rock and soil mass[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(4): 421–427, 433.

(上接第 573 页/Continued from Page 573)

- [19] 吴学成, 李江风, 方世明, 等. 地质遗迹保护视角下的地质公园旅游开发构想——以克什克腾世界地质公园阿斯哈图石林园区为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(4): 187–193.
- Wu X C, Li J F, Fang S M, et al. On the development conception of geopark from the perspective of geological relics protection: A case of Asihatu Stone Forest scenic spot in Hexigten Global Geopark[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2014, 28(4): 187–193.
- [20] 李倩, 田飞, 田明中. 内蒙古翁牛特地质公园地质遗迹分布及其保护意义[J]. 地质与资源, 2016, 25(1): 97–100.
- Li Q, Tian F, Tian M Z. Distribution and conservation of the geohéritages in Ongniud Geopark, Inner Mongolia[J]. Geology and Resources, 2016, 25(1): 97–100.
- [21] 闫远方, 武法东, 韩晋芳, 等. 创建沂蒙山世界地质公园的可行性分析[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(S2): 296–299.
- Yan Y F, Wu F D, Han J F, et al. Feasibility analysis of construction of Mount Yimengshan UNESCO global geopark[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(S2): 296–299.
- [22] 汪冰, 余振国, 李闽. 地质公园矿山公园建设助推脱贫攻坚效益评估[J]. 中国国土资源经济, 2018, 31(11): 21–25, 31.
- Wang B, Yu Z G, Li M. Benefit evaluation on the construction of geo-park and mine park promotes poverty alleviation [J]. Natural Resource Economics of China, 2018, 31(11): 21–25, 31.