

五大连池世界地质公园老黑山景区 火山地震遗迹的发现及其意义

张向格¹⁾, 张绪教^{1)*}, 刘 超^{1, 2)}, 王 鹤³⁾, 刘心兰¹⁾, 王璐琳⁴⁾

1) 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083; 2) 北京市第九中学, 北京 100041;

3) 黑龙江省生态地质调查研究院, 黑龙江哈尔滨 150030;

4) 中国地质大学(北京)自然文化研究院, 北京 100083

摘 要: 五大连池世界地质公园的老黑山、火烧山是我国有详实史料记载的喷发时间最新的活火山, 公元 1720—1721 年喷发距今已 300 年。火山地震与火山喷发关系密切, 但在熔岩台上较难区分熔岩流动造成的岩石变形与地震造成的构造变形。前人利用地震台网记录和史料记载, 对老黑山和火烧山地震的活动特征、火山喷发与地震的关系做过大量研究, 但迄今尚无火山地震造成的构造变形的发现与研究报道。在老黑山景区开展 1:2000 大比例尺地质遗迹调查时, 新发现了地表破裂、地震鼓包、挤压脊以及熔岩塌陷和滑坡等较为典型的变形遗迹, 通过对这些变形特征的研究, 尤其是与喷发熔岩在流动过程中造成的熔岩塑性变形的区分, 并与其它地区典型地震遗迹对比, 判断这些变形遗迹应为火山地震所致, 是 300 年前老黑山和火烧山火山地震的直接地质证据。老黑山景区火山地震遗迹的新发现弥补了五大连池世界地质公园地震地质遗迹的空白, 其成因的分析和时代的初步判断, 不仅对该地区地震活动规律的进一步研究具有重要的参考价值, 同时也为国内其它火山地质公园内火山地震遗迹的调查及研究提供了借鉴。

关键词: 火山地震; 地质遗迹; 世界地质公园; 五大连池; 老黑山

中图分类号: P317 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2021.122701

Discovery and Significance of Volcanic Earthquake Geoheritage of Laoheishan Scenic Area in Wudalianchi Global Geopark

ZHANG Xiang-ge¹⁾, ZHANG Xu-jiao^{1)*}, LIU Chao^{1, 2)}, WANG He³⁾, LIU Xin-lan¹⁾, WANG Lu-lin⁴⁾

1) School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083;

2) Beijing No.9 Middle School, Beijing 100041;

3) Heilongjiang General Institute of Ecological Survey and Research, Harbin, Heilongjiang 150030;

4) Institute of Nature and Culture, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083

Abstract: Laoheishan and Huoshaoshan in Wudalianchi Global Geopark in China are the latest active volcanoes with detailed historical records that erupted in 1720–1721 AD (300 years ago). It is difficult to distinguish between rock deformation caused by lava flow and structural deformation caused by the shaking due to earthquakes on lava platforms, although volcanic earthquakes are closely related to volcanic eruptions. Extensive research has been performed on volcanic eruptions and earthquakes in Laoheishan and Huoshaoshan by using seismic network records and historical materials, but there is no discovery and report on tectonic deformation caused by volcanic earthquakes. During the 1:2000 large-scale surveys of geoheritage in the Laoheishan Scenic Area, more typical structural deformation relics, such as ground cracks, earthquake mole track, extrusion ridges, lava collapse, and landslide were newly discovered. These deformations should be volcanic earthquake geoheritage based on their distinction from the

本文由黑龙江省生态地质调查研究院重要地质遗迹保护项目(编号: 2017-564)资助。

收稿日期: 2021-08-07; 改回日期: 2021-12-08; 网络首发日期: 2021-12-29。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 张向格, 女, 1997 年生。博士研究生。第四纪地质学专业。通讯地址: 100083, 北京市海淀区学院路 29 号。

E-mail: 1178732451@qq.com。

*通讯作者: 张绪教, 男, 1964 年生。教授, 博士生导师。主要从事地貌与新构造运动、旅游地学研究。E-mail: zhangxj@cugb.edu.cn。

lava plastic deformation and the comparison with typical earthquake geoheritage in other regions. They prove that earthquakes have occurred during the eruption of the Laoheishan volcano 300 years ago. The discovery of volcanic earthquake geoheritage has filled the blank in the earthquake geoheritage of Wudalianchi Global Geopark, and the analysis of this genesis and time has an important reference value for further studies on the rules of seismic activity. Furthermore, it can be a reference for the field investigation and research on volcanic seismic geoheritage in other volcanic geoparks in China.

Key words: volcanic earthquake; geoheritage; Global Geopark; Wudalianchi; Laoheishan

五大连池火山群是我国著名的第四纪火山群之一, 14 座火山中的老黑山和火烧山是我国有详实史料记载准确喷发时间的活火山, 曾在公元 1720—1721 年间喷发(陈洪洲和吴雪娟, 2003), 形成了世界罕见的火山地质遗迹, 具有重要的地质和地貌研究价值(Gao et al., 2013)。火山区发生的地震往往与火山活动关系密切(Zobin, 1972; Azzaro and Barbano, 1996; Arámbula-Mendoza et al., 2011), 地下岩浆的聚集、运移和喷发过程以及伴随的构造活动和喷发后地壳的均衡调整导致的地震被称为“火山地震”(Zobin, 1972)。因此, 造成火山地震的成因既有构造的, 也有塌陷、岩浆冲击和热效应引起的多种因素(李方正和姚文贵, 1992)。正确识别火山地震类型, 有助于认识火山区地震发生的规律, 进而协助开展火山喷发的预测和预报(刘达峰, 2008), 因此, 火山地震及其与火山喷发关系的研究越来越受到地震学家和火山地质学家的重视(陈洪洲等, 2004a)。

虽然火山地震与火山喷发之间存在着密切关系, 但目前研究火山地震主要还是利用地震台网记录的地震信号作为主要方法和材料。国外学者利用火山喷发产生的地震信号, 对二者的关系开展大量研究认为: 火山爆发前地震活动和地面变形会加速(Voight, 1988), 且地震强度与火山活动的强度密切相关(Arámbula-Mendoza et al., 2011), 可把不同能量的爆炸地震作为火山喷发不同阶段的标志(Zobin, 2016)。因此, 火山地震不仅可作为火山喷发前的征兆(Melnik et al., 2020), 而且可以通过地震信号的变化实时监测火山活动的规律(Titos et al., 2019)。

我国学者利用地震台网记录和丰富的史料记载, 对五大连池老黑山和火烧山现今地震活动特征、火山喷发与地震的关系也做过大量研究(李方正和姚文贵, 1992; 张凤鸣等, 1996, 2000; 许晓艳等, 2000; 刘云梦和郭巨国, 2010), 研究表明在老黑山附近东西两侧地震活动密集, 是现今火山区地壳浅层活动强的部位(张凤鸣等, 2000); 火山区地震震源一般较浅, 震级较小(李方正和姚文贵, 1992; 陈洪洲等, 2004b; 闫成国和张文朋, 2013)。前人还利用地震台网监测的数据, 对我国的长白山、腾冲、琼北、大同等第四纪火山区的地震活动开展了广泛研

究(明跃红等, 2006; 吕政等, 2007; 谭雨文等, 2011), 研究认为琼北、大同记录的地震为构造地震, 腾冲和长白山地区记录的地震为火山地震(刘国明等, 2006; 闫成国和张文朋, 2013)。火山地震活动不仅与区域构造关系密切(马明志等, 1996; 刘云梦和郭巨国, 2010), 而且火山区内岩浆囊体的存在可以控制火山区的地热活动及微小构造破裂(叶建庆等, 2003)。

与上述大量研究成果形成鲜明对比的是, 目前国内关于火山地震遗迹的野外直接证据的发现和报道却非常少。究其原因, 是由于在野外对火山区熔岩流动造成的岩石变形与火山地震造成的构造变形进行准确的区分非常困难, 在活火山区准确区分火山地震遗迹和构造地震遗迹更是难上加难。构造地震与火山地震都会导致地表变形并形成地震遗迹, 构造地震在非火山岩区形成的地震遗迹在野外相对较易识别, 国内学者有较多关于地裂缝、地震鼓包、拉分盆地、地震滑坡等构造地震遗迹的发现报道(吴中海等, 2004; 吴珍汉等, 2006; 孙鑫喆等, 2012; 李跃华等, 2013; 李海兵等, 2015; 李晓等, 2017; 黄小龙等, 2021); 而火山活动诱发的火山地震过程复杂, 不均匀的地应力、温度变化、流动的流体或气体爆炸是火山地震能量释放的单独或综合原因(Hammer and Ohrnberger, 2012), 因此, 在世界各地火山区观测到的火山地震信号表现出了多种特征(明跃红等, 2009)。

野外如何识别并确认火山地震遗迹? 如何将其与熔岩流动造成的岩石变形以及与构造地震造成的构造变形加以区分? 这一问题的解决不仅对火山地震的调查及识别有所帮助, 更重要的是能将其作为古地震的证据, 对活火山区地震活动规律的研究及火山活动的预测起到一定的作用。因此, 在火山熔岩区开展火山地震遗迹的调查及研究, 具有非常重要的理论和实际意义。笔者在老黑山景区开展 1: 2000 大比例尺地质遗迹调查时, 首次在熔岩台地上发现了地表破裂、地震鼓包、挤压脊、熔岩塌陷和滑坡等较为典型的地震变形遗迹, 不仅增加了五大连池世界地质公园新的地质遗迹类型, 而且通过火山地震与火山喷发的关系及成因机制的初步研究,

还可为五大连池地区的地震和火山喷发预测提供新的思路和方法, 对老黑山火山喷发 300 周年也具有一定的纪念意义。

1 地质公园概况

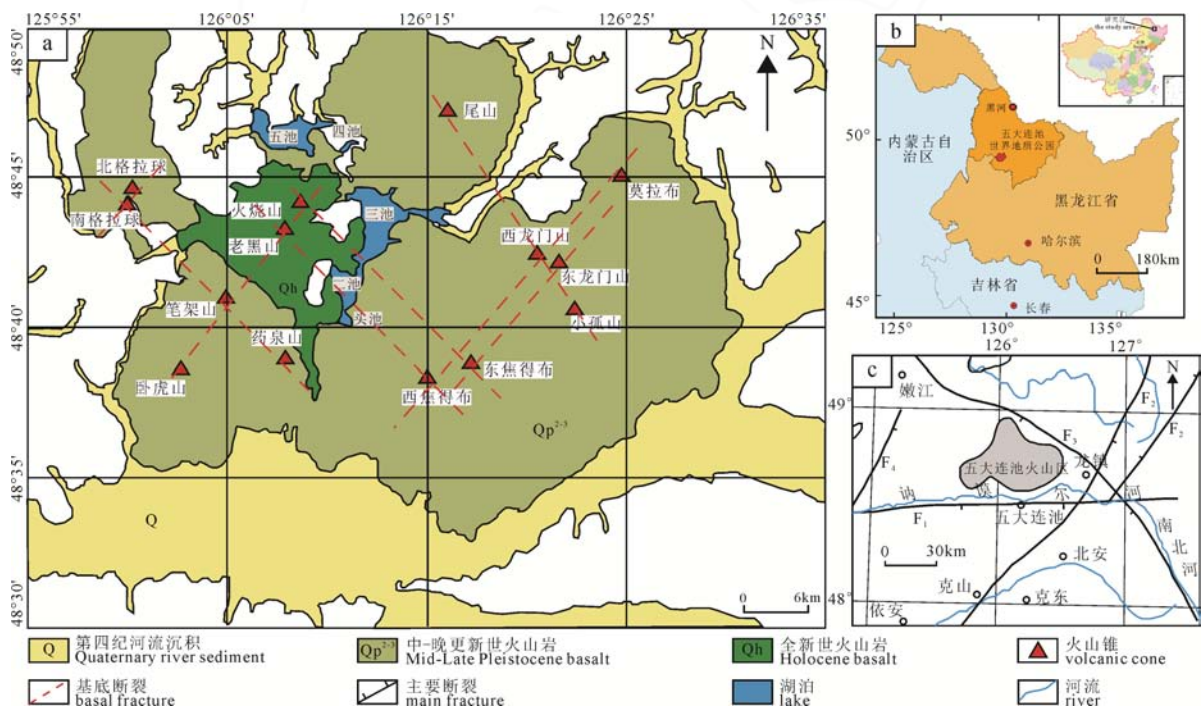
五大连池世界地质公园位于黑龙江省西北部的黑河市西南部, 距五大连池市区 18 km, 距哈尔滨市 380 km, 地处小兴安岭山地向松嫩平原的过渡地带, 地理坐标为北纬 $48^{\circ}36'$ — $48^{\circ}50'$ 、东经 $125^{\circ}57'$ — $126^{\circ}30'$, 总面积为 $1\ 060\text{ km}^2$ 。火山区总共有 14 座火山锥, 老黑山和火烧山在 1720—1721 年的喷发导致白河河道被熔岩流阻塞, 形成五个串珠状火山堰塞湖, 自南向北依次为头池子、二池子、三池子、四池子和五池子(图 1), 五大连池因此得名(钱丽萍和赵士德, 2006)。

五大连池火山区大地构造位置位于大兴安岭褶皱系与松辽凹陷的交接部位, 西为嫩江断裂、东为孙吴地堑断裂、北为小兴安岭西南缘的霍龙门—南北河断裂、南为讷漠尔河断裂(图 1)(闫成国和张文朋, 2013)。上述断裂的多期活动是造成五大连池火山区火山活动与地震活动的原因之一(张凤鸣等, 2000)。区内发育众多的断裂属深大断裂的次级断裂, 断裂构造方向主要为北东向、北西向(徐衍强, 1997), 成棋盘格子状。其中北东向断裂为规模较大的主干断裂, 北西向断裂也较为发育, 这两个方向断裂的交

汇处往往成为火山喷发的通道(图 1)(陈洪洲等, 2009)。五大连池火山群属于大陆裂谷内部、单成因的基性玄武岩质喷发, 由于岩浆黏性较低, 流动性较强, 因此形成了大面积的熔岩台地(刘嘉麒等, 1999)。

五大连池世界地质公园是我国 2004 年 2 月 13 日成功获得联合国教科文组织批准的第一批 8 个世界地质公园之一, 被称之为“天然火山博物馆”, 园区内地质遗迹种类丰富, 共有 63 种典型的地质遗迹类型, 包括火山机构地貌景观、火山熔岩地貌景观, 火山碎屑堆积地貌景观、岩石地貌景观、岩浆岩剖面、典型矿物等 8 类, 还有闻名世界的冷泉和丰富的人文景观(孙化江和钟帮权, 2004)。

老黑山景区是五大连池世界地质公园最重要和最特色的园区, 包括老黑山和火烧山两座活火山, 火山喷发以岩浆溢流为主, 溢出的熔岩是高钾玄武岩, 形成了面积 70 km^2 的新期熔岩台地(吕宗文, 1994); 由于喷发时间最新, 形成的火山地质遗迹是五大连池世界地质公园所有景区中类型最丰富、现象最典型、保存最完好的, 保存有世界罕见的喷气锥、喷气碟等火山地质遗迹, 被称为“打开的火山教科书”。该景区火山地质遗迹类型主要为火山机构、火山熔岩和火山碎屑堆积地貌景观三大类: 火山机构地貌景观包括火山锥、副火山锥等; 火山熔岩地貌景观包括翻花石海、结壳熔岩、喷气锥、喷气碟等; 火山碎屑堆积地貌景观包括火山砂砾、



a—五大连池地区地质简图(据邹颖等, 2019 修改); b—五大连池地理位置图;

c—五大连池周围断裂图(据闫成国和张文朋, 2013 修改)。

a—geological map of Wudalianchi (modified from ZOU et al., 2019); b—location of the study area;

c—faults around the Wudalianchi volcanic field (modified from YAN and ZHANG, 2013).

图 1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

火山弹等, 这些地质遗迹主要为熔岩流在喷发和流动过程中形成的火山机构和熔岩地貌, 以及火山爆炸式喷发的产物, 具有重要的科研价值和景观价值(高危言等, 2010; Gao et al., 2013)。

2 火山地震遗迹类型及特征

2.1 地表破裂

在老黑山景区开展野外地质遗迹调查时, 发现了多种与熔岩流的流动构造特征明显不同的剪切和张性地表破裂。通过对这些变形进行认真观察和研究, 发现其具有地震变形的特征, 与青海玉树地震区(2010 年)、新疆于田地震区(2014 年)和云南鲁甸地震区(2014 年)典型的地表破裂具有相似特征, 可确认为地震遗迹。

2.1.1 剪切破裂

剪切破裂主要有张剪切破裂和压剪切破裂两种类型。张剪切破裂在老黑山景区分布较广, 最典型的张剪切破裂发育在老黑山南部最早一期的熔岩台地上, 兼有左旋走滑分量和垂直于破裂走向的张开分量, 追张断距规模大小不一, 破裂拉张的距离从 0.3~1.5 m 不等(图版 I -A, B), 两侧差异升降运动不明显, 单条张剪切破裂长达数米至几十米。在有些张剪切破裂上可见到小型的拉分构造(图版 I -C, D), 菱形拉分区边长约 0.5 m。将老黑山景区的张剪切破裂及同时发育的拉分现象与于田地震区的张剪切破裂(图版 I -E)和玉树地震区的拉分构造(图版 I -F)对比, 发现二者具有相似的变形特征, 从其几何结构和规模特征上可判断为地震遗迹, 且主要表现出纯剪切左旋走滑的特征。

压剪切破裂是在平坦的熔岩台地上, 无塌陷和滑坡发生的情况下, 局部形成了北东盘抬升、南西盘下降的一种陡坎(图版 I -G), 位错 0.2~0.3 m, 走向 220°, 与五大连池火山区内北东向的断裂呈锐角相交, 具有逆冲抬升分量。压剪切破裂走向与竹排状熔岩代表的熔岩流的方向一致, 明显垂直切割了熔岩台地表面的竹排状熔岩, 说明熔岩是在完全固结后被剪切力所剪断的, 而非熔岩流动形成的, 应属于地震陡坎。

2.1.2 张性破裂

张性破裂也是老黑山景区典型的地表破裂的一种, 主要分布在老黑山南部和东北部, 破裂面总体较为平直, 拉张宽度介于 0.1~0.5 m 范围内, 两侧台地无明显差异升降。如果是熔岩冷却过程中由于收缩造成的张性破裂, 应该是不规则状的、类似于龟裂纹一样的(图版 I -H), 而不可能形成如图版 I -I 中这么齐整和平直的破裂, 所以推断在老黑山

熔岩台地上发育的这些张性破裂, 应为地震作用形成的地表破裂而非熔岩流动过程中形成的熔岩变形。

2.1.3 地表破裂走向统计分析

地表破裂延伸方向的规律, 与其成因密切相关。如果是纯粹的构造地震造成的地表破裂, 则具有一定方向的优势走向(陈正位等, 2010; 孙鑫喆等, 2012)。将老黑山景区野外调查测量的 59 条地表破裂的走向数据统计成表, 绘制的走向玫瑰花图(图 2)显示地表破裂的方向整体呈放射状, 无优势方位, 与构造地震地表破裂带不同, 符合火山活动引发地表变形的特点。

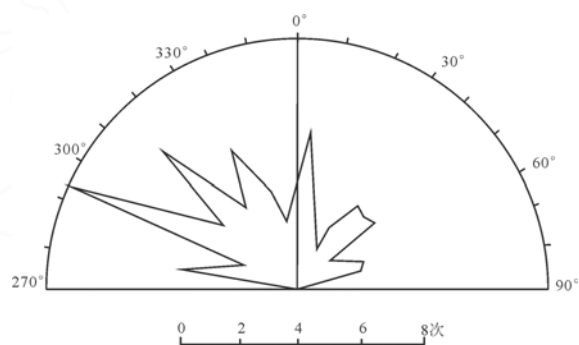


图 2 老黑山景区地表破裂走向玫瑰花图
Fig. 2 Strike rose diagram of ground cracks in the Laoheishan Scenic Area

2.2 地震鼓包

老黑山一带发现很多在熔岩台地上成带分布、大规模强烈变形的熔岩鼓包(图版 II -A), 鼓包规模大小不一, 隆起最高的可达 15 m, 非常明显是固结的熔岩被后期强大的作用力自下而上顶起来的。地下熔岩的流动尤其是上涌也能造成地表熔岩的变形, 但主要应以塑性变形特征为主, 与此差异较大。老黑山熔岩台地上的这些熔岩鼓包, 明显以垂直方向的作用力造成的脆性变形为主, 与非火山岩区地震形成的地震鼓包特征及形成机制一致, 由此推断应为地震鼓包。老黑山景区发育在熔岩台地上的地震鼓包规模较大且保存完好, 是因为老黑山表层均为新鲜固结的玄武岩, 使得地震鼓包能很好地保存, 而成为老黑山曾经发生过古地震的重要证据之一。

2.3 挤压脊

地表因地震活动受到水平方向的挤压作用而产生变形, 常形成挤压脊。老黑山景区挤压脊主要有两种类型, 一种是在熔岩台地上完全固结的厚层熔岩, 由于受到构造运动的挤压形成挤压脊, 这种挤压脊的特征类似于紧闭褶皱且规模比较大, 由于强烈的挤压力形成近放射状节理(图版 II -B); 另一种挤压脊比较常见, 发育在地势平坦的熔岩台地上,

以熔岩管道的挤压变形为主要特征, 水平方向的挤压力使得熔岩管道发生变形并在中部折断形成屋檐状挤压脊, 其中能观察到原来熔岩管道里熔岩流动形成的熔岩刺棘, 这种挤压脊规模一般较小, 脊高 0.4~1.8 m(图版 II -C)。

2.4 熔岩塌陷及滑坡

在老黑山景区的熔岩台地上发育有大量的塌陷和滑坡。熔岩塌陷的类型主要有环形塌陷和带状塌陷。环形塌陷分布最广(图版 II -D), 由于地震致使地下熔岩空洞顶板熔岩产生坍塌而成, 规模较大的直径可达 20 m, 深 2~3 m。带状塌陷主要发育在老黑山与笔架山西南方向连线上, 主要原因是火山喷发后形成的熔岩隧道, 由于地震而发生大规模的塌陷, 形成延伸较远的塌陷谷地(图版 II -E)。老黑山南侧的熔岩隧道塌陷后局部顶板熔岩残留在地表形成十分罕见的“天生桥”景观(图版 II -F), 桥高 3 m、宽约 6 m, 这种“熔岩拱桥”与其它成因的“天生桥”成因明显不同, 且因其难以保存的稀有性而更具有价值。“天生桥”下为原来岩浆流动的熔岩隧道, 地震塌陷后可见熔岩隧道内保存完好的绳状熔岩(图版 II -G), 可较好地指示当时岩浆的流动方向; 在熔岩隧道的洞壁上发育有熔岩钟乳和熔岩棘刺, 熔岩钟乳长 2~4 cm, 分布密集, 是熔岩流在隧道内流走后残余的熔岩在滴落过程中凝固形成的。

地震滑坡作为一种常见且破坏力巨大的次生地震地质灾害, 越来越引起学者们的重视(殷志强等, 2014, 2016; 黄小龙等, 2021)。在老黑山景区两期熔岩台地交界且地势高差较大的地段, 由于地震活动易导致边坡失稳, 熔岩台地在重力作用下整体滑塌, 形成典型的地震滑坡(图版 II -H, I, J)。老黑山火山口西侧熔岩台地发育规模较大的滑坡, 野外可观察到多级滑坡后壁和滑坡台地(图版 II -I, J), 滑坡后壁附近还可见单条弧形断裂或平行分布的较平直的断裂。老黑山火山口西侧两期熔岩台地边界处发育的滑坡是古地震活动的重要证据之一。

3 火山地震时间的推断

老黑山景区发现的地表破裂、地震鼓包、挤压脊以及熔岩塌陷和滑坡等均具有地震变形的特征,

说明老黑山地区曾经发生过地震, 那么对古地震发生的时间进行确定就显得非常重要了。由于古地震发生在火山岩分布区, 且与火山喷发时熔岩流动造成的变形区分困难, 加上目前对年轻的玄武岩缺少有效的直接测年方法, 因此, 要直接确定古地震的时间是非常困难的。但恰恰由于火山地震与火山喷发相伴而生(Lahr et al., 1994; Roman and Cashman, 2006; 刁守中, 2019), 因此可以通过老黑山景区的古地震遗迹与火山岩之间的关系, 然后利用火山喷发的时间来尝试间接推断古地震活动的时间。

历史上记载的五大连池火山区 1719 年 10 月—1722 年 4 月的地震属于火山地震。1719 年 10 月 23 日、11 月 22 日、12 月 31 日这三次地震间隔时间短, 地震大小大致相当, 没有主震, 因此, 从地震序列上分析, 它们不是主震-余震型的构造地震, 而是火山构造地震群, 属于高频地震(陈洪洲等, 2004a, b)。

老黑山和火烧山停止喷发后, 地震台网监测的数据表明 1983 年以来五大连池火山区也发生过多地地震, 尤其是 1986 年发生了 4 次震级 5.0 级左右的中强地震, 但震中位置偏离五大连池火山群, 而且发震断层为走向北北东右旋走滑断层(李方正和姚文贵, 1992; 张凤鸣等, 2000), 不是导致老黑山景区内熔岩变形的来源。结合老黑山景区内地震遗迹与各种熔岩地貌有相互切割覆盖的关系可推测这些地震遗迹的形成与老黑山、火烧山多阶段的喷发密切相关, 故初步推断这些地震遗迹是由老黑山和火烧山 1720—1721 年火山喷发前后诱发的火山地震活动引起的。

4 讨论

4.1 地震震级与烈度

根据鄢家全等(2011)提出的《中国历史地震烈度表》(2010), 由老黑山景区内广泛发育的平地开裂的地表现象可推测老黑山景区地震烈度最高能达到Ⅷ度。构造地震的震级与震中烈度和震源深度之间有一定关系, 阎志德和郭履灿(1984)通过最小二乘法和二元线性回归计算法, 利用多个地震的震级(M), 烈度(I), 震源深度(h)资料, 给出了中国地震震级与震中烈度和震源深度之间关系的修正公式:

表 1 老黑山—火烧山火山喷发和地震时间表(据陈洪洲等, 2004b)
Table 1 Time of volcanic eruptions and earthquakes in Laoheishan-Huoshao Shan (after CHEN et al., 2004b)

火山喷发起止时间		地震时间	特点
老黑山	1720-01-14—1721-03-18	1719-10-23	发震地点在火山喷发区;
		1719-11-22	震级不大(< 5 级);
		1719-12-31	震群形式发生
火烧山	1721-04-26—1721-05-28	1721-04-12	较弱的震群, 中短期前兆;
		1721-10-27	地震频率变低;
		1722-04-27	偶有地震发生

$M = 0.56I_0 + 0.75\log h + 0.63(I_0 \text{ 为震中烈度})$ 。火山地震的震源较浅,一般不超过 10 km(刘云梦和郭巨国, 2010), 根据该公式计算可得老黑山景区地震震级在 5 级左右, 与史料记载一致(陈洪洲等, 2009)。火山地震虽然震级小, 影响范围也不大, 但由于震源浅, 其破坏力较强(李方正和姚文贵, 1993; 刘云梦和郭巨国, 2010), 所以造成的熔岩变形程度较大。

4.2 火山地震与构造地震

在老黑山景区新发现的大量变形应属地震遗迹, 但这些是火山地震还是构造地震造成的变形? 仅从野外特征较难加以区分。根据野外观察到的部分地震遗迹被后期熔岩再次覆盖的现象, 结合地震仪器记录 and 老黑山、火烧山的多个喷发旋回(白志达等, 1999), 说明这些地震遗迹与火山活动关系密切, 故推断为火山地震所致。将老黑山景区地表破裂、地震鼓包、挤压脊以及熔岩塌陷和滑坡的位置在图上标注出来(图 3), 可以看到这些遗迹围绕老黑山火山口分布, 而且地表破裂在空间上不具备线性展布的特征, 这点与构造地震形成的地表破裂带明显不同。

火山地震可以划分为高频(A 型)地震、低频(B 型)地震、爆炸地震和火山颤动四种类型(Chouet, 1996), 由于无波形记录, 显然要将这些地震遗迹分别划归为上述 4 种类型的哪一种也比较困难(陈洪洲等, 2004a)。根据文字记录至少可以确定老黑山和火烧山在火山喷发前、中、后发生过高频地震和爆炸地震这两种火山地震, 且高频地震是岩层剪切或滑动造成的, 并且以震群的形式表现出来(陈洪洲等, 2004a)。从野外特征来看, 地表破裂有剪切和滑动分量的特征符合高频地震的特点, 虽然这种

破裂与一般的构造地震难以区分, 但从动力源来看它们与大尺度的构造板块运动引起的纯构造地震是有区别的(明跃红等, 2009); 熔岩台地上发育的熔岩塌陷谷地及“天生桥”可能是火山颤动导致, 这样才能使得熔岩隧道及其顶板的熔岩在地震后还能局部保留下来; 爆炸地震的震源较浅, 所以在震中附近造成的熔岩破坏也较强烈, 地震鼓包的变形程度较大, 有可能是爆炸地震造成的地震遗迹。而在熔岩台地边部的熔岩台地交界处大规模的滑坡及塌陷可能是能量较大的爆炸地震形成的。

地表破裂可能由多种类型的地震造成。根据史料记载的火烧山喷发和伴随喷发产生的地震情况, “1721 年 4 月 26 日, 在新山(老黑山)东北方 6 里远、蔓延之石的边缘地带, 地又破裂, 发出响声, 略见火光、烟和石头”(陈洪洲等, 2004a), 可见爆炸地震也能产生地表破裂, 所以不同的地表破裂可能是不同类型的火山地震引起的。

4.3 新发现火山地震遗迹的科研及地学旅游价值

首次发现的老黑山景区火山地震遗迹具有重要的科研价值。野外发育的古地震遗迹是判断和研究古地震的重要和最直接的证据, 在古地震的研究中具有重要的价值和无可替代的地位。虽然前人通过历史记录、文献分析和地震监测判断老黑山曾经发生过火山地震, 但迄今没有老黑山地震遗迹的发现和报道, 国内其它火山岩区此类报道也很少。本研究为火山地震的确定提供了直接的野外构造变形的证据, 通过对这些古地震遗迹的系统研究和对比, 为火山岩区古地震的识别提供了新的方向和思路, 因此具有较重要的科研价值。从这些地震导致的熔岩构造变形的直接证据入手, 通过火山地震遗迹与火山喷发的关系的分析, 推断老黑山和火烧山一带发育的地震遗迹的地震的时间可能为 1720—1721 年前后, 进而使五大连池火山地震的时空变化更加清晰, 可为五大连池地区的地震和火山喷发预测提供新的思路和重要的参考, 更重要的是能为国内其他火山地质公园地震地质遗迹的调查和研究提供借鉴。

其次, 新发现的火山地震遗迹弥补了五大连池世界地质公园地质遗迹的空白, 且具有很好的景观价值和旅游价值, 可为老黑山景区的地学旅游增添新的内容和素材。新发现和初步确认的地表破裂、地震鼓包、挤压脊以及熔岩塌陷和滑坡等古地震遗迹不仅是难得的科学研究材料, 也是极好的科普素材和地学旅游景观, 尤其是熔岩塌陷形成的十分罕见的熔岩拱桥(天生桥), 具有极高的观赏价值。新发现的火山地震遗迹中有部分离景区内道路和栈道很近, 为了使这些地质遗迹的科普价值得到最大的发

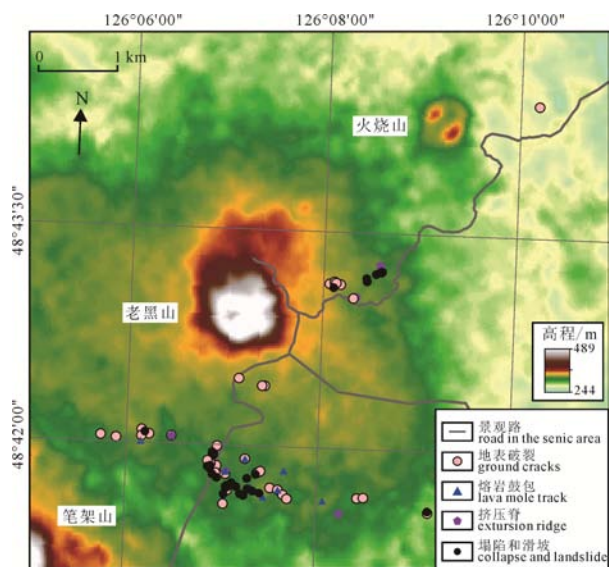


图 3 老黑山景区地震遗迹分布图

Fig. 3 Distribution map of earthquake geoheritage in the Laoheishan Scenic Area

挥, 景区内应当采取相应的保护和开发措施, 在火山地震遗迹发育的地方设置标识牌和解说牌, 将它们的形成原因和过程进行详细的介绍, 让游客通过真实存在的地震遗迹对火山地震过程有直观的了解, 以提高广大游客的防震减灾和保护大自然的意识。

5 结论

(1)这是五大连池地区关于火山地震遗迹的首次报道。老黑山景区熔岩台地上地表变形强烈, 不仅地表破裂、地震鼓包、挤压脊等构造变形特征明显, 而且固结熔岩产生的大规模塌陷和滑坡也主要为地震所致, 因此, 这些遗迹应属古地震遗迹; 又因古地震与老黑山、火烧山的火山活动密切相关, 因此将其定为火山地震遗迹。

(2)根据老黑山景区火山地震遗迹的特征及其与火山熔岩的关系, 并结合史料的记载, 初步判断新发现的火山地震遗迹可能形成于公元 1720—1721 年前后。老黑山景区地震烈度推测最高能达到Ⅷ度, 根据公式 $M = 0.56I_0 + 0.75\log h + 0.63$ 计算地震震级最高可达 5 级, 与史料记载基本一致。

(3)五大连池世界地质公园老黑山景区火山地震遗迹的新发现, 弥补了五大连池世界地质公园地震地质遗迹的空白, 提升了公园内地质遗迹的科研和科普价值, 为公园内的地学旅游尤其是中小学生的研学旅行提供了新的材料和内容, 同时也为国内其他火山地质公园的火山地震的发现和um研究提供了借鉴和参考。

Acknowledgements:

This study was supported by Heilongjiang General Institute of Ecological Survey and Research (No. 2017-564).

参考文献:

- 白志达, 孙善平, 李家振, 刘永顺. 1999. 五大连池新期火山锥体结构及喷发过程[J]. 地质论评, 45(S1): 369-377.
- 陈洪洲, 高峰, 吴雪娟, 孟宪森. 2004a. 从历史记录看地震与火山喷发关系[J]. 地震学报, 26(4): 448-453+456.
- 陈洪洲, 刘永顺, 高峰. 2004b. 五大连池老黑山火山的两次喷发活动[J]. 自然灾害学报, 13(1): 94-99.
- 陈洪洲, 吴雪娟. 2003. 五大连池火山 1720—1721 年喷发观测记录[J]. 地震地质, 25(3): 491-500.
- 陈洪洲, 杨金山, 王丽梅, 李天翔, 欧阳兆国, 张立忱. 2009. 五大连池老黑山、火烧山的火山喷发特征[J]. 世界地质, 28(3): 291-296.
- 陈正位, 杨攀新, 李智敏, 李家辑. 2010. 玉树 7.1 级地震断裂特征与地震地表破裂带[J]. 第四纪研究, 30(3): 628-631.
- 刁守中. 2019. 我国火山地震事例[J]. 华南地震, 39(S1): 1-10.
- 高危言, 李江海, 毛翔, 张天然. 2010. 五大连池火山群喷气锥

- 成因机制探讨[J]. 岩石学报, 26(1): 309-317.
- 黄小龙, 吴中海, 刘锋, 田婷婷, 黄小巾, 张铎. 2021. 滇西北程海断裂带主要古地震滑坡及其分布特征的构造解释[J]. 地学前缘, 28(2): 125-139.
- 李方正, 姚文贵. 1992. 略论五大连池火山地震[J]. 吉林地质, (2): 47-54.
- 李方正, 姚文贵. 1993. 东北火山分布及火山地震特征浅析[J]. 东北地震研究, 9(4): 69-73.
- 李海兵, 潘家伟, 孙知明, 刘栋梁, 张佳佳, 李成龙, 刘亢, CHEVALIER Marie-Luce, 云锟, 龚正. 2015. 2014 年于田 Ms7.3 地震地表破裂特征及其发震构造[J]. 地质学报, 89(1): 180-194.
- 李晓, 裴向军, 刘洋. 2017. 2014 年 8 月云南鲁甸 Ms6.5 地震典型地表破裂特征[J]. 震灾防御技术, 12(2): 338-345.
- 李跃华, 吴中海, 叶培盛, 马丹, 刘艳辉, 蒋瑶, 李家存, 周春景. 2013. 玉树断裂带左旋走滑活动标志及其几何学与运动学特征[J]. 地质通报, 32(9): 1410-1422.
- 刘达峰. 2008. 长白山天池火山地震活动类型及其机理分析[J]. 科技资讯, (14): 241.
- 刘国明, 张恒荣, 孔庆军. 2006. 长白山天池火山区的地震活动特征分析[J]. 地震地质, 28(3): 503-508.
- 刘嘉麒, 郭正府, 刘强. 1999. 火山灾害与监测[J]. 第四纪研究, (5): 414-422.
- 刘云梦, 郭巨国. 2010. 我国东北火山地震的特征及成因探讨[J]. 吉林地质, 29(3): 1-5.
- 吕政, 洪江净, 魏海泉. 2007. 长白山天池火山地震活动机理研究[J]. 东北地震研究, 23(1): 40-48.
- 吕宗文. 1994. 黑龙江五大连池火山群现代火山构造及其形成机制[J]. 火山地质与矿产, 15(1): 5-21.
- 马明志, 张兴科, 侯立平. 1996. 长白山天池火山地震类型与地震分布[J]. 地震地磁观测与研究, 17(6): 39-44.
- 明跃红, 苏伟, 房立华. 2006. 长白山天池火山地震类型及火山活动性的初步研究[J]. 中国地震, 22(1): 56-63.
- 明跃红, 吴建平, 房立华, 王未来. 2009. 火山地震信号和火山颤动震源模型[J]. 地球物理学进展, 24(2): 382-390.
- 钱丽萍, 赵士德. 2006. 基于地质遗迹的地质公园可持续发展模式研究——以五大连池世界地质公园为例[J]. 资源开发与市场, 22(6): 557-560.
- 孙化江, 钟帮权. 2004. 五大连池火山地貌景观及其开发保护[J]. 国土与自然资源研究, (3): 72-74.
- 孙鑫磊, 徐锡伟, 陈立春, 谭锡斌, 于贵华, 李智敏, 苏桂武, 王继, 张晓清. 2012. 2010 年玉树地震地表破裂带典型破裂样式及其构造意义[J]. 地球物理学报, 55(1): 155-170.
- 谭雨文, 刘铁男, 马铭志, 李雪梅, 张昕. 2011. 长白山天池火山地震活动特征[J]. 科技资讯, (5): 213-214.
- 吴珍汉, 胡道功, 吴中海, 刘琦胜. 2006. 东昆仑南部西大滩断裂的地震鼓包及形成时代[J]. 地质论评, 52(1): 15-24.
- 吴中海, 胡道功, 吴珍汉. 2004. 青藏铁路侧邻昆仑山 2001 年 Ms 8.1 级地震地表破裂特征分析[J]. 地球学报, 25(4): 411-414.
- 徐衍强. 1997. 五大连池第四纪火山群的喷发类型和喷发型式[J].

黑龙江地质, 8(4): 3-11, 28.

许晓艳, 张凤鸣, 张守国. 2000. 五大连池火山构造地震波特征的初步研究[J]. 东北地震研究, 16(1): 44-48.

鄢家全, 张志中, 王健, 温增平, 俞言祥, 刘爱文, 潘华, 吕红山, 郝玉芹. 2011. 中国历史地震烈度表研究[J]. 地震学报, 33(4): 515-531.

闫成国, 张文朋. 2013. 第四纪火山活动典型地区地震活动特征研究[J]. 防灾减灾学报, 29(1): 13-24.

阎志德, 郭履灿. 1984. 论中国地震震级与震中烈度的关系及其应用[J]. 中国科学 B 辑, (11): 1050-1058.

叶建庆, 蔡绍平, 刘学军, 王绍晋, 蔡明军. 2003. 腾冲火山地震群的活动特征[J]. 地震地质, 25(S1): 128-137.

殷志强, 赵无忌, 褚宏亮, 孙巍. 2014. “4·20”芦山地震诱发地质灾害基本特征及与“5·12”汶川地震对比分析[J]. 地质学报, 88(6): 1145-1156.

殷志强, 徐永强, 陈红旗, 撒兰鹏, 姜兴武. 2016. 2014 年云南鲁甸地震触发地质灾害发育分布规律及与景谷、盈江地震对比研究[J]. 地质学报, 90(6): 1086-1097.

张凤鸣, 许晓艳, 张守国, 周皓. 2000. 五大连池火山构造环境与地震活动[J]. 自然灾害学报, 9(3): 133-137.

张凤鸣, 张守国, 邹卫东. 1996. 五大连池火山构造地震空间分布及其构造含义[J]. 东北地震研究, 12(4): 17-22.

邹颖, 赵勇伟, 樊祺诚. 2019. 五大连池火山带的火山喷发方式及灾害类型[J]. 地震地质, 41(1): 189-207.

References:

ARÁMBULA-MENDOZA R, LESAGE P, VALDÉS-GONZÁLEZ C, VARLEYD N R, REYES-DÁVILA G, NAVARRO C. 2011. Seismic activity that accompanied the effusive and explosive eruptions during the 2004-2005 period at Volcán de Colima, Mexico[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 205(1-2): 30-46.

AZZARO R, BARBANO M S. 1996. Relationship between seismicity and eruptive activity at Mt. Etna Volcano (Italy) as inferred from historical record analysis: the 1883 and 1971 case histories[J]. Annali Di Geofisica, 39(2): 445-461.

BAI Zhi-da, SUN Shan-ping, LI Jia-zhen, LIU Yong-shun. 1999. Cone structure and eruption process of modern volcanoes in the Wudalianchi Area, Heilongjiang province[J]. Geological Review, 45(S1): 369-377(in Chinese with English abstract).

CHEN Hong-zhou, GAO Feng, WU Xue-juan, MENG Xian-sen. 2004a. Relationship between earthquake and volcanic eruption inferred from historical records[J]. Acta Seismologica Sinica, 26(4): 448-453, 456(in Chinese with English abstract).

CHEN Hong-zhou, LIU Yong-shun, GAO Feng. 2004b. Two-stage eruptions of Laoheishan Volcano in Wudalianchi[J]. Journal of Natural Disasters, 13(1): 94-99(in Chinese with English abstract).

CHEN Hong-zhou, WU Xue-juan. 2003. Observation records of

the eruption of Wudalianchi volcanoes in 1720—1721 AD[J]. Seismology and Geology, 25(3): 491-500(in Chinese with English abstract).

CHEN Hong-zhou, YANG Jin-shan, WANG Li-mei, LI Tian-xiang, OUYANG Zhao-guo, ZHANG Li-chen. 2009. Volcanic eruption features of Laoheishan and Huoshaoshan in Wudalianchi[J]. Global Geology, 28(3): 291-296(in Chinese with English abstract).

CHEN Zheng-wei, YANG Pan-xin, LI Zhi-min, LI Jia-ji. 2010. Characteristics of Ms7.1 Yushu earthquake fault and the surface rupture[J]. Quaternary Sciences, 30(3): 628-631(in Chinese with English abstract).

CHOUET B A. 1996. Long-period volcano seismicity: its source and use in eruption forecasting[J]. Nature, 380: 309-316.

DIAO Shou-zhong. 2019. Examples of volcanic earthquakes in China(review and discussion)[J]. South China Journal of Seismology, 39(S1): 1-10(in Chinese with English abstract).

GAO Wei-yan, LI Jiang-hai, MAO Xiang, ZHANG Tian-ran. 2010. Discussion on genetic mechanism of hornitos in Wudalianchi volcanic field[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(1): 309-317(in Chinese with English abstract).

GAO Wei-yan, LI Jiang-hai, MAO Xiang, LI Hong-guang. 2013. Geological and geomorphological value of the monogenetic volcanoes in Wudalianchi National Park, NE China[J]. Geoheritage, 5: 73-85.

HAMMER C, OHRNBERGER M. 2012. Forecasting seismo-volcanic activity by using the dynamical behavior of volcanic earthquake rates[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 229-230: 34-43.

HUANG Xiao-long, WU Zhong-hai, LIU Feng, TIAN Ting-ting, HUANG Xiao-jin, ZHANG Duo. 2021. Tectonic interpretation of main paleoseismic landslides and their distribution characteristics in Chenghai fault zone, Northwest Yunnan[J]. Earth Science Frontiers, 28(2): 125-139(in Chinese with English abstract).

LAHR J C, CHOUET B A, STEPHENS C D, POWER J A, PAGE R A. 1994. Earthquake classification, location, and error analysis in a volcanic environment: implications for the magmatic system of the 1989-1990 eruptions at redoubt volcano, Alaska[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 62(1-4): 137-151.

LI Fang-zheng, YAO Wen-gui. 1992. A Preliminary discussion on the seism of the Wudalianchi volcano[J]. Jilin Geology, (2): 47-54(in Chinese with English abstract).

LI Fang-zheng, YAO Wen-gui. 1993. Volcanic distribution and feature of volcanic earthquake in Northeast China[J]. Seismological Research of Northeast China, 9(4): 69-73(in Chinese with English abstract).

LI Hai-bing, PAN Jia-wei, SUN Zhi-ming, LIU Dong-liang, ZHANG Jia-jia, LI Cheng-long, LIU Kang, CHEVALIER M

- L, YUN Kun, GONG Zheng. 2015. Seismogenic structure and surface rupture characteristics of the 2014 Ms 7.3 Yutian earthquake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 89(1): 180-194(in Chinese with English abstract).
- LI Xiao, PEI Xiang-jun, LIU Yang. 2017. Characteristics of surface rupture of the Ludian Ms 6.5 earthquake in Yunnan Province[J]. *Technology for Earthquake Disaster Prevention*, 12(2): 338-345(in Chinese with English abstract).
- LI Yue-hua, WU Zhong-hai, YE Pei-sheng, MA Dan, LIU Yan-hui, JIANG Yao, LI Jia-cun, ZHOU Chun-jing. 2013. The geomorphologic and geological marks of the active left-lateral strike-slip fault and the characteristics of geometry and kinematics along the Yushu fault zone in southeastern Tibet[J]. *Geological Bulletin of China*, 32(9): 1410-1422(in Chinese with English abstract).
- LIU Da-feng. 2008. Analysis on seismic activity types and mechanism of the Changbaishan Tianchi volcano[J]. *Science and Technology Information*, (14): 241(in Chinese).
- LIU Guo-ming, ZHANG Heng-rong, KONG Qing-jun. 2006. Analysis of the seismic activity at the Changbaishan Tianchi volcano[J]. *Seismology and Geology*, 28(3): 503-508(in Chinese with English abstract).
- LIU Jia-qi, GUO Zheng-fu, LIU Qiang. 1999. Volcanic hazards and monitoring[J]. *Quaternary Sciences*, (5): 414-422(in Chinese with English abstract).
- LIU Yun-meng, GUO Ju-guo. 2010. Characteristics and genesis of volcanic earthquakes in Northeast China[J]. *Jilin Geology*, 29(3): 1-5(in Chinese with English abstract).
- LÜ Zheng, HONG Han-jing, WEI Hai-quan. 2007. Research on the volcanic earthquake activity mechanism in Changbaishan Tianchi area[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 23(1): 40-48(in Chinese with English abstract).
- LU Zong-wen. 1994. Volcanic structure of the present-day volcanic group Wudalianchi and its forming mechanism[J]. *Volcanology and Mineral Resources*, 15(1): 5-21(in Chinese with English abstract).
- MA Ming-zhi, ZHANG Xing-ke, HOU Li-ping. 1996. Volcanic earthquake types and distributor at tianchi, Changbai Shan[J]. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 17(6): 39-44(in Chinese with English abstract).
- MELNIK O, LYAKHOVSKY V, SHAPIRO N M, GALINA N, BERGAL-KUVIKAS O. 2020. Deep long period volcanic earthquakes generated by degassing of volatile-rich basaltic magmas[J]. *Nature Communications*, 11(1): 3918.
- MING Yue-hong, SU Wei, FANG Li-hua. 2006. A preliminary study of types of volcanic earthquakes and volcanic activity in Changbaishan, Tianchi Volcano[J]. *Earthquake Research in China*, 22(1): 56-63(in Chinese with English abstract).
- MING Yue-hong, WU Jian-ping, FANG Li-hua, WANG Wei-lai. 2009. Volcanic seismic signals and tremor source models[J]. *Progress in Geophysics*, 24(2): 382-390(in Chinese with English abstract).
- ROMAN D C, CASHMAN K V. 2006. The origin of volcano-tectonic earthquake swarms[J]. *Geology*, 34(6): 457-460.
- VOIGHT B. 1988. A method for prediction of volcanic eruptions[J]. *Nature*, 332(6160): 125-130.
- QIAN Li-ping, ZHAO Shi-de. 2006. Study on sustainable geo-park development of model based on the geological relics—Taking Wudalianchi World Geo-park as an example[J]. *Resource Development & Market*, 22 (6): 557-560(in Chinese with English abstract).
- SUN Hua-jiang, ZHONG Bang-quan. 2004. Development and protection of Landscape of volcano physiognomy in Wudalianchi[J]. *Territory and Natural Resource Study*, (3): 72-74(in Chinese with English abstract).
- SUN Xin-zhe, XU Xi-wei, CHEN Li-chun, TAN Xi-bin, YU Gui-hua, LI Zhi-min, SU Gui-wu, WANG Ji, ZHANG Xiao-qing. 2012. Surface rupture features of the 2010 Yushu earthquake and its tectonic implication[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 55(1): 155-170(in Chinese with English abstract).
- TAN Yu-wen, LIU Yi-nan, MA Ming-zhi, LI Xue-mei, ZHANG Xin. 2011. Seismic activity characteristics of the Changbaishan Tianchi volcano[J]. *Science and Technology Information*, (5): 213-214(in Chinese).
- TITOS M, BUENO A, GARCÍA L, BENÍTEZ M C, IBAÑEZ J. 2019. Detection and classification of continuous volcano-seismic signals with recurrent neural networks[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 57(4): 1936-1948.
- WU Zhen-han, HU Dao-gong, WU Zhong-hai, LIU Qi-sheng. 2006. Pressure ridges and their ages of the Xidatan strike-slip fault in South Kunlun Mts[J]. *Geological Review*, 52(1): 15-24(in Chinese with English abstract).
- WU Zhong-hai, HU Dao-gong, WU Zhen-han. 2004. Characteristics of co-seismic surface rupture of the 2001 Ms 8.1 central Kunlun earthquake in the area adjacent to the Qingzang railway[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 25(4): 411-414(in Chinese with English abstract).
- XU Yan-qiang. 1997. The type and pattern of eruption in the Quaternary Wudalianchi volcanic cluster[J]. *Heilongjiang Geology*, 8(4): 3-11, 28(in Chinese with English abstract).
- XU Xiao-yan, ZHANG Feng-ming, ZHANG Shou-guo. 2000. Research for characters of tectonic seismic waves in Wudalianchi volcanic region[J]. *Seismological Research of Northeast China*, 16(1): 44-48(in Chinese with English abstract).
- YAN Jia-quan, ZHANG Zhi-zhong, WANG Jian, WEN Zeng-ping, YU Yan-xiang, LIU Ai-wen, PAN Hua, LV Hong-shan, HAO Yu-qin. 2011. A study on seismic intensity scale of Chinese historical earthquakes[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 33(4): 411-414(in Chinese with English abstract).

515-531(in Chinese with English abstract).

YAN Cheng-guo, ZHANG Wen-peng. 2013. Research on seismic activity characteristics of typical Quaternary volcanic region[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 29(1): 13-24(in Chinese with English abstract).

YAN Zhi-de, GUO Lü-can. 1984. Discussion on the relationship and application of earthquake magnitude and epicenter intensity in China[J]. Science in China Series B, (11): 1050-1058(in Chinese).

YE Jian-qing, CAI Shao-ping, LIU Xue-jun, WANG Shao-jin, CAI Ming-jun. 2003. Characteristics of earthquake cluster activity in Tengchong volcanic area[J]. Seismology and Geology, 25(S1): 128-137(in Chinese with English abstract).

YIN Zhi-qiang, ZHAO Wu-ji, CHU Hong-liang, SUN Wei. 2014. Basic characteristics of geohazards induced by Lushan earthquake and compare to them of Wenchuan earthquake[J]. Acta Geologica Sinica, 88(6): 1145-1156(in Chinese with English abstract).

YIN Zhi-qiang, XU Yong-qiang, CHEN Hong-qi, SA Lan-peng, JIANG Xing-wu. 2016. The development and distribution characteristics of geohazards induced by August 3, 2014 Ludian earthquake and comparison with Jinggu and Yingjiang earthquakes[J]. Acta Geologica Sinica, 90(6): 1086-1097(in Chinese with English abstract).

ZHANG Feng-ming, XU Xiao-yan, ZHANG Shou-guo, ZHOU Hao. 2000. The volcano tectonic environment and earthquake activity in Wudalianchi[J]. Journal of Natural Disasters, 9(3): 133-137(in Chinese with English abstract).

ZHANG Feng-ming, ZHANG Shou-guo, ZOU Wei-dong. 1996. Space distribution of earthquake of Wudalianchi volcanic area and tectonic implication[J]. Seismological Research of Northeast China, 12(4): 17-22(in Chinese with English abstract).

ZOBIN V M. 1972. Focal mechanism of volcanic earthquakes[J]. Bulletin Volcanologique, 36(4): 561-571.

ZOBIN V. 2016. Introduction to volcanic seismology(Third Edition)[M]. Amsterdam: Elsevier: 21-25, 323-359.

ZOU Ying, ZHAO Yong-wei, FAN Qi-cheng. 2019. The volcanic activities and hazard prediction of Wudalianchi volcanic

belt[J]. Seismology and Geology, 41(1): 189-207(in Chinese with English abstract).

图版说明

图版 I Plate I

- A, B-老黑山景区“Z”字形张剪切破裂;
C, D-老黑山景区拉分构造;
E-于田地震区张剪切破裂(据李海兵等, 2015);
F-玉树地震区拉分构造(据孙鑫喆等, 2012);
G-木排状熔岩中压剪切破裂;
H-龟裂;
I-张性破裂
A, B-“Z” like transtensional crack in Laoheishan Scenic Area;
C, D-small pull-apart structure in Laoheishan Scenic Area;
E-transtensional crack in Yutian(after LI et al., 2015);
F-small pull-apart structure in Yushu(after SUN et al., 2012);
G-tension crack in “raft-like lava”;
H-map cracking;
I-transpressional crack

图版 II Plate II

- A-地震鼓包;
B, C-挤压脊;
D-环形塌陷;
E-塌陷谷地;
F-熔岩桥;
G-“熔岩桥”下的“绳状熔岩”;
H, I, J-熔岩滑坡
A-earthquake mole track;
B, C-extrusion ridge;
D-annular lava collapse;
E-collapse valley;
F-lava bridge;
G-“ropy-like lava” under “lava bridge”;
H, I, J-lava landslide

图版 I Plate I



图版 II Plate II

