

大兴安岭中段阿尔山地区第四纪火山地貌特征及其构造意义

马雨轩^{1,2} 李江海^{1,2,†} 陈耀华³

1. 造山带与地壳演化教育部重点实验室, 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 北京大学石油与天然气研究中心, 北京 100871; 3. 北京大学城市与环境学院, 北京 100871; † 通信作者, E-mail: jhli@pku.edu.cn

摘要 基于资源三号(ZY-3)的高分辨率卫星影像和数字高程模型(DEM), 运用地理信息系统(GIS)技术, 通过遥感影像解译以及地形起伏度和坡度的定量计算, 分析阿尔山火山区的地质地貌特征。共识别出19座第四纪喷发的火山, 并且将其划分为5个类型。该区火山地貌按地形起伏度可分为4个类型, 以低位中山为主(39.61%), 其次为低位低山(36.24%)。80%的椭圆形火山锥长轴走向介于45°~75°之间, 中值为58.5°, 与NE向排列的小东沟火山-十号沟盆地火山-岩山-高山火山链走向平行。火山锥的马蹄形缺口主要朝向为NE向, 也有SW向和NW向。NE向与SW向马蹄形缺口的角度中值相差约180°, NW向的马蹄形缺口与NW向的断裂几乎平行, 推测存在控制火山喷发和展布的NE向断裂。根据研究结果推断, 中生代的基底断裂使该区形成NE走向的脆弱裂隙带, 为岩浆提供良好的上侵通道; 裂隙控制着岩浆的上升, 形成呈NE向线性分布的火山机构, 并最终影响地表火山锥的分布和地貌形态。

关键词 阿尔山火山; 火山地貌; 遥感影像解译; 数字高程模型(DEM); 断裂

Geomorphological Characteristics of the Quaternary Volcanoes and Their Tectonic Implications in Aershan Region, Central Greater Khingan Range

MA Yuxuan^{1,2}, LI Jianghai^{1,2,†}, CHEN Yaohua³

1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution (MOE), School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871; 2. Institute of Oil and Gas, Peking University, Beijing 100871; 3. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871; † Corresponding author, E-mail: jhli@pku.edu.cn

Abstract Based on ZY-3 high resolution satellite image and digital elevation model (DEM), the authors obtained volcanic geomorphology features in Aershan volcanic region by means of satellite image interpretation, the relief degree of surface and surficial-slope analysis. According to the results of the study, 19 Quaternary volcanos were found. They could be divided into five categories. The landforms can be divided into four classes according to relief degree of surface. Low position middle mountain is the main type (39.61%), followed by low position low mountain (36.24%). 80% of the long axis direction of the elliptical volcanic cones are ranging from 45° to 75° with a median value of 58.5°. It is parallel to the NE-trending volcanic chain of Xiaodonggou volcano-Shihaogou basin volcano-Yanshan-Gaoshan. The horseshoe-shaped craters are in the direction of NE, SW and NW. The median difference between NE and SW horseshoe-shaped craters is about 180°. The NW horseshoe craters are almost parallel to NW faults. The authors predict that there are NE faults controlling volcanic eruption and distribution. Thereby an inference can be drawn that the NE-trending fractured zones were controlled by Mesozoic basement faults in the study area, and provided the channel for magma to approach. Fracture controlled the magma ascending and the formation of NE-trending volcanic apparatus, and eventually affected the distribution of volcanic cones and morphology.

Key words Aershan volcanos; volcano geomorphology; satellite image interpretation; DEM; fault

2017年5月,联合国教科文组织批准阿尔山国家地质公园成为世界地质公园,其地貌以天池镇更新世至全新世典型火山地貌为代表。阿尔山火山群是中国第七大活火山群,拥有15座火山、3个火山口湖、1个玛珥湖、7个火山堰塞湖以及数百个火山丘,熔岩呈现多种多样的形态,有翻花石、喷气锥、熔岩洞和熔岩冢等罕见的火山地貌景观。

刘嘉麒^[1]利用K-Ar年代学方法,测得阿尔山天池玄武岩年龄为 0.340 ± 0.203 Ma。白志达等^[2]2005年测得岩山火山岩中的碳化木¹⁴C年龄为2000 a,属全新世火山,现今仍存在喷发的可能性。白志达等^[3]2012年对阿尔山地区火山喷发期次、岩石类型及火山带构造进行归纳,认为内蒙古东部晚第四纪火山活动分为3期——晚更新世早期、晚更新世晚期和全新世,并总结了内蒙古东部地区火山地质和火山活动特征;樊祺诚等^[4]利用K-Ar年代学方法,将火山活动分为早、中、晚更新世和全新世4期。文献[5-8]通过主量和微量元素、同位素及稀土元素分析,对岩浆成因模式进行探究。文献[9-11]总结了该区火山地貌特征。文献[12-14]利用大地电磁及地球波速结构测定等手段,获得深部信息并进行反演,结果表明阿尔山地区深部仍存在热源。

虽然对阿尔山火山的地质研究已较充分,但基于数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),运用地理信息系统(Geo-Information System, GIS)方法的地质地貌定量研究尚不足。本文通过遥感影像解译,并计算地形起伏度与坡度,识别和分析阿尔山地区的火山机构特征及其与区域构造断裂的关系。

1 地质背景

阿尔山位于内蒙古自治区东部大兴安岭中段,地理坐标为 $120^{\circ}14' - 121^{\circ}20'E$, $47^{\circ}15' - 47^{\circ}45'N$ 。该区位于南蒙古-兴安造山带与大兴安岭北段晚古生代增生造山带之间,兴安造山带东段,兴安微陆块南部^[2]。自早侏罗世始,受太平洋板块俯冲的影响和欧亚板块的阻挡,研究区发育一系列NE向的断裂,形成NE向的构造格局和规模不等的火山岩带,如大兴安岭火山岩带、松辽盆地东缘火山岩带等^[15]。我国东部的新生代火山岩主要沿大陆边缘一系列NE向或NNE向的断陷盆地和裂谷分布,东北地区在日本海拉张的背景下发生频繁的玄武质岩浆喷发活动,形成阿尔山火山带、五大连池火山和长白山火山群等^[5,16]。阿尔山-柴河第四纪火山带

沿哈拉哈河呈NE向带状分布(图1)。

2 阿尔山地区火山地貌解译

近年来,随着地理信息系统技术和软件的不断发展,利用GIS软件平台以及高分辨率卫星影像和数字高程模型进行不同尺度地貌分析的研究方法得到广泛的应用^[17-20],但在火山区地貌研究中的应用相对较少^[21]。与利用地质图和地形图的传统地质研究方法相比,上述方法在三维可视化、地貌参数提取以及地貌形态分析方面具有突出的优势^[22]。

本文采用上述方法,探讨阿尔山地区火山机构的地貌特征。主要数据来源:1)资源三号(ZY-3)卫星2 m高分辨率真彩色正射卫星影像;2)对ASTER GDEM(V1)数据加工得到的空间分辨率为30 m的2009年全球数字高程数据产品,数据投影坐标为UTM/WGS84,来自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。

2.1 遥感地貌解译

阿尔山火山区的地貌主要由火山锥、熔岩流及熔岩台地、火山口湖、火山堰塞湖及植被水系等组成。本文选取资源三号卫星2 m高分辨率真彩色正射卫星影像作为平面解译信息源,完成地貌的识别与类型划分。在遥感影像上,火山影像特征与区域地貌、地质、水文、植被和土壤等因素相关,不同类型火山地貌的图斑、色调和纹理存在差异,容易分辨^[23]。就研究区而言,建立的解译标志是基于不同地貌特征的差异,确定火山锥形态和熔岩流的空间分布。具体解译标志见表1,解译结果见图2。

2.2 数字高程模型解译

本文依据阿尔山火山区DEM数据,划分不同火山地貌类型,并分析各种类型的地貌特征。根据遥感解译结果,该区火山地貌主要有火山机构地貌和火山熔岩地貌两大类,其中火山机构地貌又分为不同形态的火山锥、火山渣锥和熔岩台地以及火山口湖等。鉴于分析火山锥的地貌学特征对解释该区构造对火山成因的制约有重要意义,本文重点讨论不同形态的火山锥。

阿尔山地区沿NE向的火山带呈现中间低、两侧高的特征(图3(a)和(b)),火山锥海拔较高,最高者为高山火山锥(1715 m)。熔岩台地被NE向裂谷带截断,火山锥沿裂谷带两侧呈串珠状分布,形成两条近平行的火山链(图3(a))。

因具有典型的火山构造及熔岩地貌,火山地貌

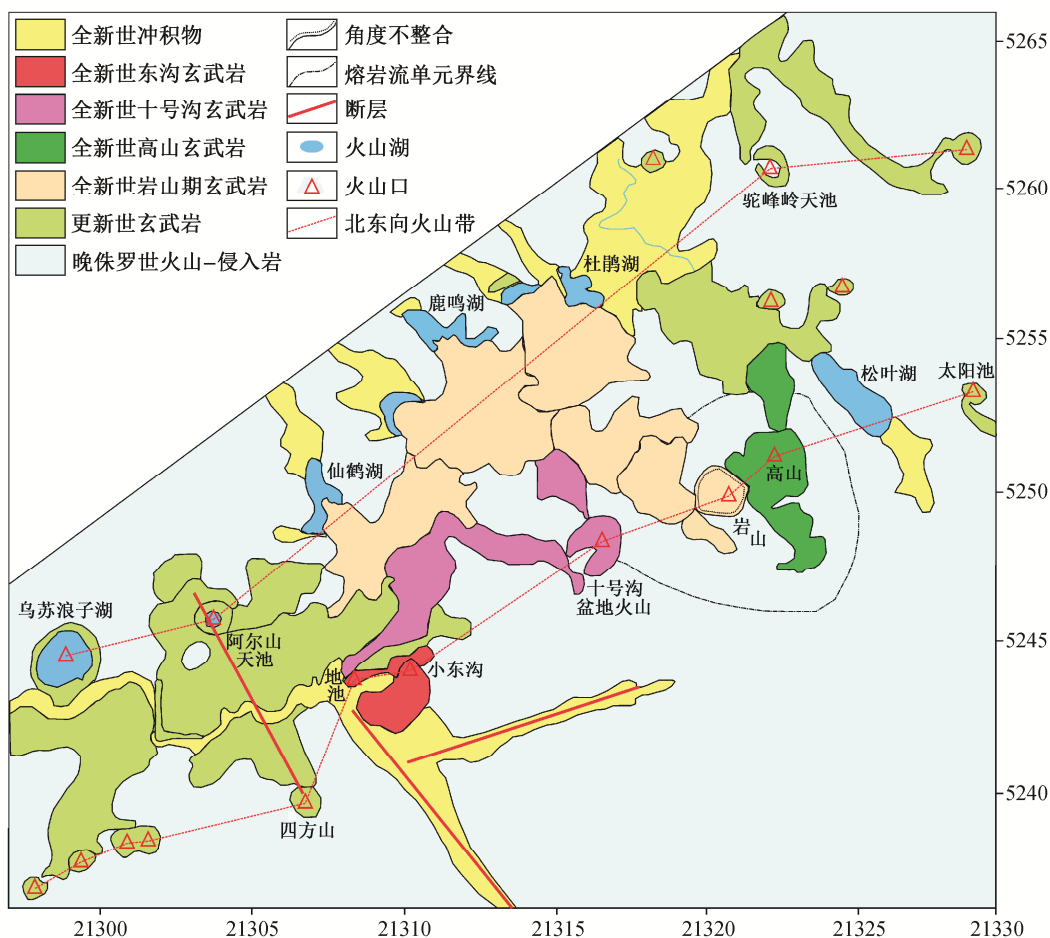


图 1 阿尔山地区地质简图(据文献[2,11]修改)

Fig. 1 Simplified geological map in Aershan region (modified from Ref. [2,11])

表 1 阿尔山地区火山地貌遥感解译标志

Table 1 Satellite image interpretation signs of volcanic geomorphology in Aershan region

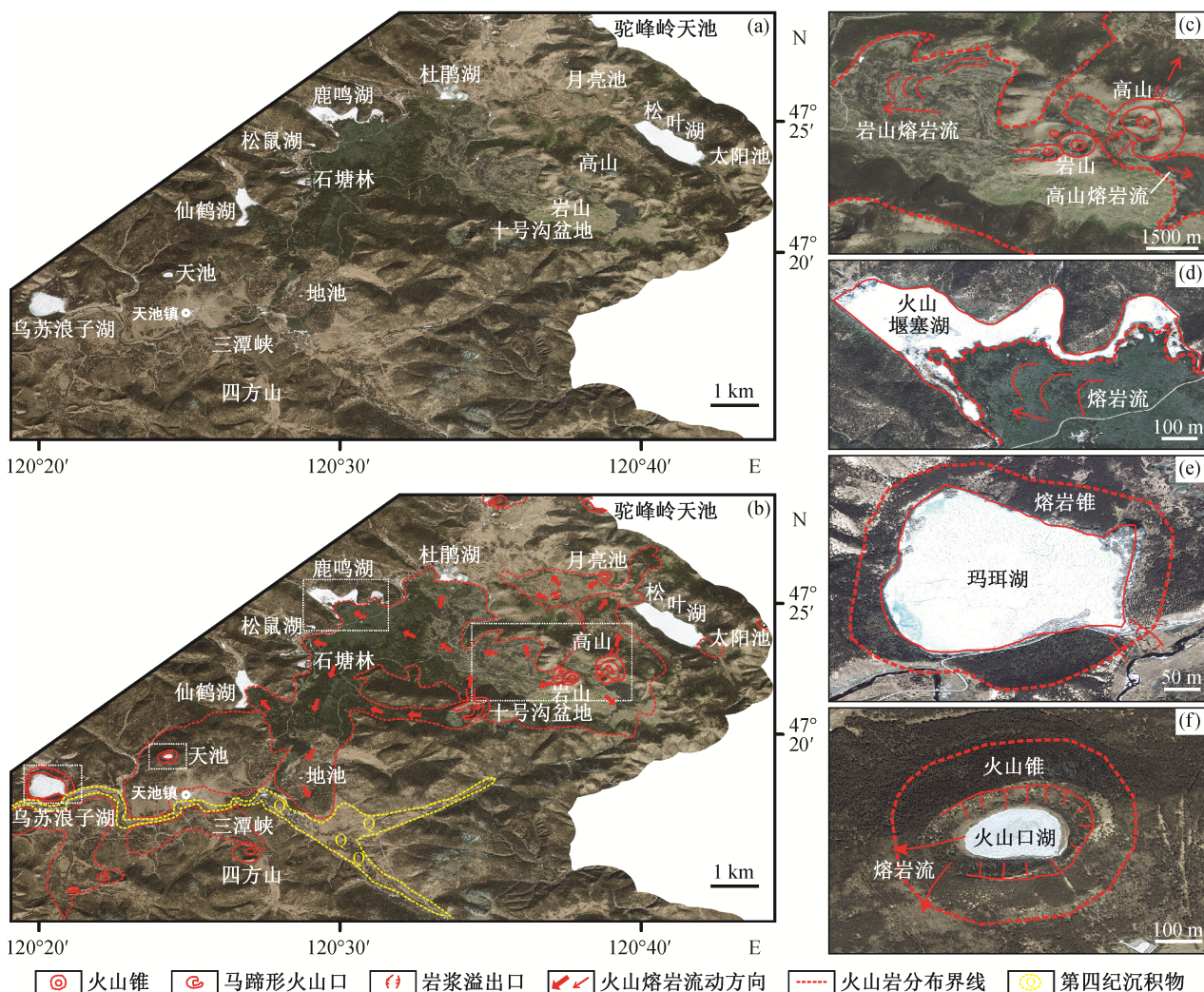
火山地貌类型	遥感解译标志	实例
火山锥	多呈近圆状或椭圆状锥体, 形成时代越新, 锥体越陡峻, 在火山口边部通常有具一定朝向的火山溢出口, 火山锥周围可见熔岩流, 有的火山口积水形成火山口湖	高山、岩山(图 2(c)); 阿尔山天池火山(图 2(f))
火山熔岩流及熔岩台地	整体色调均一, 局部因熔岩流冷却塌陷而呈波纹状或斑状, 边界不规则, 阻塞河道形成多个火山堰塞湖	岩山熔岩流(图 2(c)和(d))
火山口湖	驼峰形或椭圆形等, 海拔较高	驼峰岭天池、阿尔山天池(图 2(f))
玛珥湖	近圆形, 火山口较低且平坦, 规模比火山口湖大	乌苏浪子湖(图 2(e))
火山堰塞湖	水体被熔岩流围限, 湖岸被围限一侧呈不规则状, 沿哈拉哈河呈串珠状展布	鹿鸣湖、杜鹃湖(图 2(d))
断裂带	同时期火山呈 NE 向线状展布, 火山锥朝向有一定的规律	小东沟火山-十号沟盆地火山-岩山-高山带

与山地地貌有明显的区别。由于风化剥蚀作用及地表植被等的影响, 因此很难从高程数据中将火山地貌直接解译出来, 需要通过提取地形起伏度和坡度来确定火山锥的位置和形貌。

地形起伏度指某一特定区域内最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值, 是描述地貌形态的定量指标, 也是划分地貌类型的客观依据。阿尔山火山

区海拔较高, 说明该地区处于地貌发育的初级阶段, 没有遭受强烈的侵蚀作用, 经夷平作用的低起伏度地貌主要分布在哈拉哈河沿岸等区域。阿尔山火山区受大兴安岭地区隆起导致的河流侵蚀作用较强, 地形起伏较大, 高程差值可达 1120 m。

根据高玄或^[24]的地貌分类标准, 将阿尔山火山区地貌按地形起伏度划分为低位平原(0~20 m)、低



(a) 阿尔山地区火山地貌遥感图像; (b) 阿尔山地区火山地貌遥感解译图; (c) 高山火山锥、岩山火山锥及熔岩流; (d) 鹿鸣湖; (e) 乌苏浪子湖; (f) 阿尔山天池。底图据 ZY-3 卫星影像图

图2 阿尔山地区火山地貌遥感解译图

Fig. 2 Satellite image interpretation of volcanic geomorphology in Aershan region

位丘陵(20~200 m)、低位低山(200~500 m)和低位中山(500~1000 m)4个类型(图3(b))。利用GIS软件,计算得到各类地貌的面积占比(表2)。阿尔山火山区地貌以低位中山和低位低山为主,低位中山的面积占比最大(39.61%),其次为低位低山(36.24%)。

坡度是描述地表单元陡缓程度的指标,是识别地貌特征和划分地貌类型的基本要素,可将从GIS提取的坡度环形异常判定为火山锥(图3(c))。晚期形成的火山锥风化程度较低,保留着火山机构地貌特征,地形起伏度和坡度均较大,可以将地形起伏度和坡度两图层的栅格数值相乘,增强异常值,得到新的地貌提取图(图3(d))^[25]。

研究区坡度分布具有以下特征: 1) 火山锥体与

熔岩台地的坡度相差较大; 2) 熔岩台地内部坡度变化很小(0°~5°); 3) 火山锥体的坡度在15°~48°之间变化,从锥底到锥顶坡度变化较大,呈环状或马蹄状分布。研究区火山主要分布于NE向展布的低地两侧,晚期的火山(如高山和岩山)形成更陡峭的锥体,坡度明显大于早期形成的火山(如1404高地火山和1259高地火山)。

3 火山地貌分类及特征

地质调查显示,阿尔山火山区共有20座火山锥(或火山台地)^[4],本文通过遥感影像和数字高程模型,解译出其中19个火山锥,解译成功率为95%。我们以遥感影像数据解译结果以及DEM数据提取

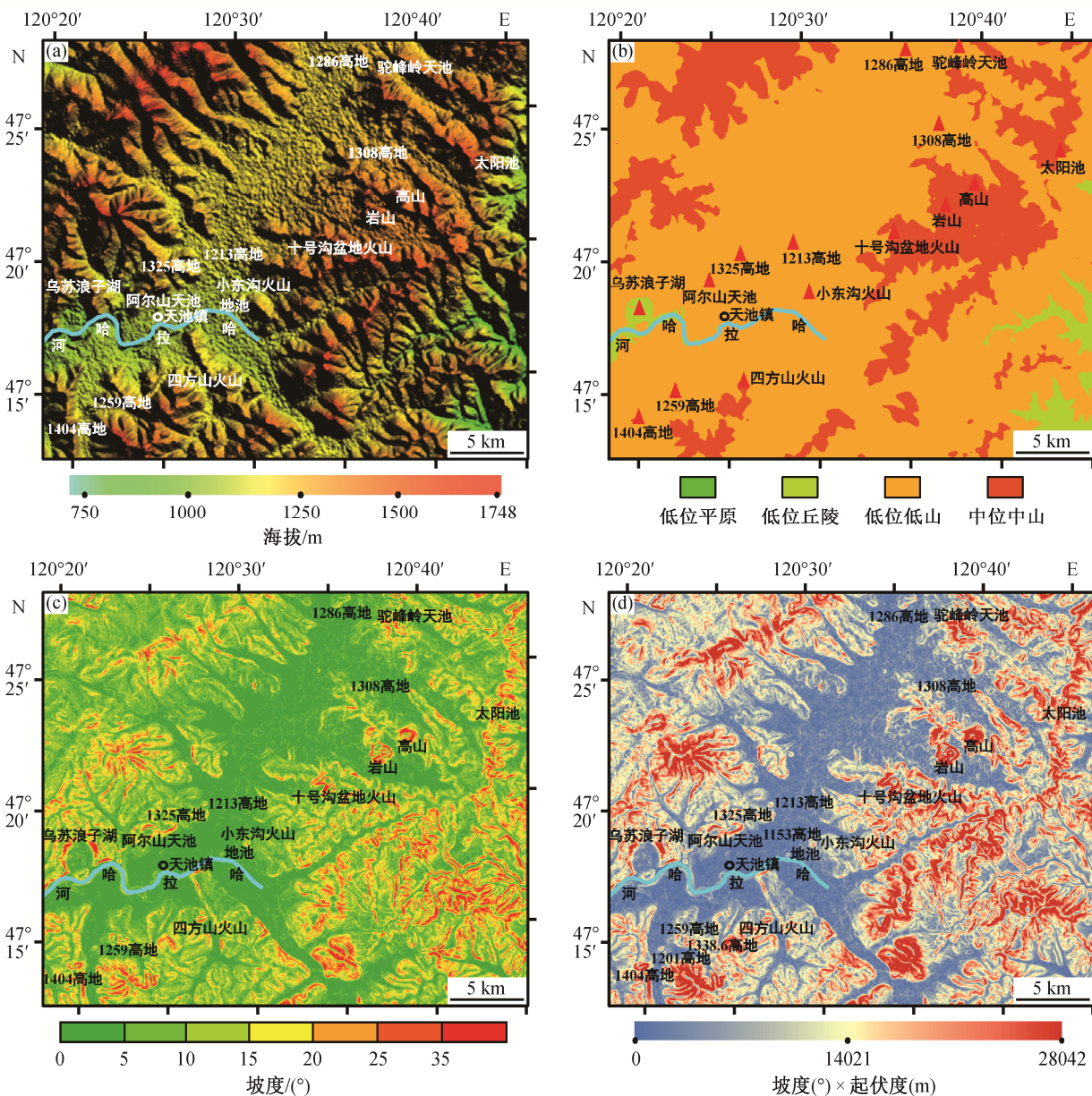


图3 阿尔山地区数字高程模型解译图
Fig. 3 DEM interpretation of Aershan region

表2 阿尔山地区地形起伏度分级
Table 2 Classification statistics according to relief in Aershan region

地貌类型	地形起伏度/m	比例/%
低位平原	0~20	2.42
低位丘陵	20~200	21.73
低位低山	200~500	36.24
低位中山	500~1000	39.61

的火山地貌信息为依据,同时考虑地球内动力和外营力的差异性,将阿尔山地区火山机构地貌分为5种类型(表3)。

I类 以高山和岩山为代表,遥感影像特征表现为浅灰色近圆形图案,可见大量熔岩流凝固形成的波纹状图案,火山锥体均呈马蹄形,存在方向一致的溢出口,锥体长轴方向趋同(图2(c))。火山锥体保存完好,较陡峭,海拔均较高,为单锥或复合锥,顶部溅落锥呈截顶的锥体。火山锥多属于低位中山,相对高程差值一般超过200 m。火山口呈陡峭漏斗状,未形成火山口湖。火山产物以熔岩流为主,伴随降落渣锥,熔岩流面积差别较大(5~10 km²)。喷发规模大,为斯通博利式或亚布力尼式喷发,火山形成时间多为全新世。

表 3 阿尔山地区火山机构地貌类型
Table 3 Geomorphologic types of volcanic apparatus in Aershan region

类型	火山名称	经纬度	形成时代	锥底长轴直径/m	锥底短轴直径/m	火山锥缺口朝向/(°)	火山锥长轴朝向/(°)	地貌特征及成因
I 类	高山	120°39'00"E, 47°22'01"N	全新世	2300		48		火山锥呈圆马蹄形或复合锥形, 火山口半径为 225 m, 火山锥高度为 362 m, 海拔为 1715 m; 火山产物以熔岩流为主, 熔岩流面积为 5 km ² ; 斯通博利式喷发, 最近一次喷发时间为 1990±100 aBP ^[2]
	岩山	120°37'30"E, 47°21'28"N	全新世	1600		249		火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为 210 m, 火山锥高度为 233 m; 火山产物以火山渣锥、火山碎屑席和熔岩流为主, 熔岩流面积为 50 km ² ; 亚布力尼式喷发, 最近一次喷发时间为 1990±100 aBP ^[2]
	十号沟盆地火山	120°34'14"E, 47°20'28"N	全新世	1850		52		火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为 500 m, 火山锥高度为 224 m; 火山产物以火山渣锥和熔岩流为主, 熔岩流面积为 25 km ² ; 斯通博利式喷发
II 类	四方山	120°26'54"E, 47°15'45"N	中更新世	1000	800	80	75	火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为 115 m, 火山锥高度为 110 m, 海拔为 1215 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主, 熔岩流面积为 5 km ² ; 斯通博利式喷发
	阿尔山天池火山	120°24'16"E, 47°19'00"N	中更新世	1500	1050	146	51	火山锥呈马蹄形, 复式锥, 火山口半径为 185 m, 火山锥高度为 126 m, 海拔为 1235 m; 火山产物以熔岩流为主, 熔岩流面积为 8 km ² [26]; 斯通博利式喷发
	驼峰岭天池	120°38'36"E, 47°27'19"N	中更新世	1550		318		火山锥呈长马蹄形, 复式锥, 形成于 0.246±0.05 Ma ^[4] ; 火山口半径为 550 m, 火山锥高度为 170 m, 海拔为 1338 m; 火山产物以熔岩及熔岩流为主, 熔岩流面积为 12 km ² ; 湖泊长半径为 500 m, 短半径为 150 m, 面积为 0.24 km ² ; 斯通博利式喷发
III 类	太阳池	120°44'00"E, 47°23'23"N	中更新世	750		222		火山锥呈圆马蹄形, 复式锥, 火山口半径为 210 m, 火山锥高度为 122 m; 火山产物以熔岩及熔岩流为主, 熔岩流面积为 11 km ² ; 湖泊长半径为 50 m, 短半径为 50 m, 面积为 0.01 km ² ; 斯通博利式喷发
	乌苏浪子湖	120°20'10"E, 47°17'54"N	晚更新世早期	2900				火山锥呈圆形, 基浪堆积, 形成于 0.45±0.3 Ma ^[3] ; 火山锥高度为 150 m, 海拔为 1045 m; 火山产物以熔岩堆及熔岩流为主, 熔岩流面积为 2 km ² ; 射气岩浆喷发

续表

类型	火山名称	经纬度	形成时代	锥底长轴 直径/m	锥底短轴 直径/m	火山锥缺 口朝向/(°)	火山锥长 轴朝向/(°)	地貌及成因特征	
IV类	1404 高地	120°19'47"E, 47°14'08"N	中更新世	1200	800	45	68	火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为100 m, 火山锥高度为254 m, 海拔为1404 m; 火山产物以降落渣锥、熔岩流为主	
	1201 高地	120°21'03"E, 47°14'31"N	中更新世	750	620	69	80	火山锥呈长马蹄形, 火山口半径为200 m, 火山锥高度为50 m, 海拔为1201 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1259 高地	120°22'13"E, 47°14'56"N	中更新世	900		354		火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为200 m, 火山锥高度为60 m, 海拔为1259 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1338.6 高地	120°22'40"E, 47°14'56"N	中更新世	800		336		火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为140 m, 火山锥高度为138 m, 海拔为1338.6 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1325 高地	120°25'00"E, 47°19'09"N	中更新世	1500	850	63	60	火山锥呈马蹄形, 火山口半径为140 m, 火山锥高度为175 m, 海拔为1325 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1153 高地	120°29'04"E, 47°18'21"N	中更新世	470	150	87	81	火山锥呈长马蹄形, 火山口半径为10 m, 火山锥高度为35 m, 海拔为1153 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1213 高地	120°27'27"E, 47°20'02"N	中更新世	550	450	54	65	火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为105 m, 火山锥高度为73 m, 海拔为1213 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1308 高地	120°37'08"E, 47°24'17"N	中更新世	640	480	235	57	火山锥呈长马蹄形, 火山口半径为205 m, 火山锥高度为38 m, 海拔为1308 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	1286 高地	120°35'18"E, 47°27'30"N	中更新世	850	700	267	45	火山锥呈圆马蹄形, 火山口半径为200 m, 火山锥高度为76 m, 海拔为1286 m; 火山产物以降落渣锥和熔岩流为主	
	V类	地池	120°28'41"E, 47°18'18"N	中更新世	250		56		火山锥呈坑形, 海拔为1125 m; 火山产物以熔岩流为主

II类 以阿尔山天池为代表, 遥感影像特征表现为浅灰色椭圆形锥体中央存在一个亮白色的近椭圆形图案, 可见锥体的马蹄形缺口(图2(f))。火山锥保存完整, 属于碎屑锥, 较陡峭, 多为复式锥, 相对高程差值一般在120~170 m之间。火山口呈近圆形或近椭圆形, 积水成湖, 直径在200~550 m之间, 面积不超0.24 km², 存在溢出口, 但是未被熔岩流破坏。火山产物以熔岩流为主, 面积均超过10 km²。喷发规模较大, 为较弱的斯通博利式喷发, 火山形成时间均为中更新世。

III类 以乌苏浪子湖为代表, 具有典型的玛珥湖特征, 遥感影像特征表现为灰色近圆形图案, 水体面积比II类火山口湖大(图2(e))。火山锥体呈近圆形, 属于低位丘陵, 相对高程差值为150 m。湖泊是火山在中生代破火山口基础上重新喷发形成的, 形状受破火山口影响较大。破火山口一般比第四纪以来基性岩浆喷发成因的火山口大, 因此玛珥湖也比火山口湖规模大。火山产物以熔岩堆为主, 熔岩流面积为2 km²。喷发方式为射气岩浆喷发, 基浪堆积, 形成于晚更新世早期。

IV类 遥感影像特征表现为灰黑色近椭圆形图案, 火山锥比I类低矮, 可见马蹄形缺口, 熔岩流分布不如I类清晰, 熔岩台地海拔低且平坦, 有的被第四纪沉积物覆盖。火山锥高度差别较大, 锥体海拔在1100~1400 m之间, 属于低位低山。火山口半径在100~200 m之间, 未见陡峭漏斗状火山口, 存在方向一致的溢出口, 火山锥长轴方向趋同。火山产物以降落渣锥和熔岩流为主, 顶部溅落锥已被

不同程度地剥蚀。

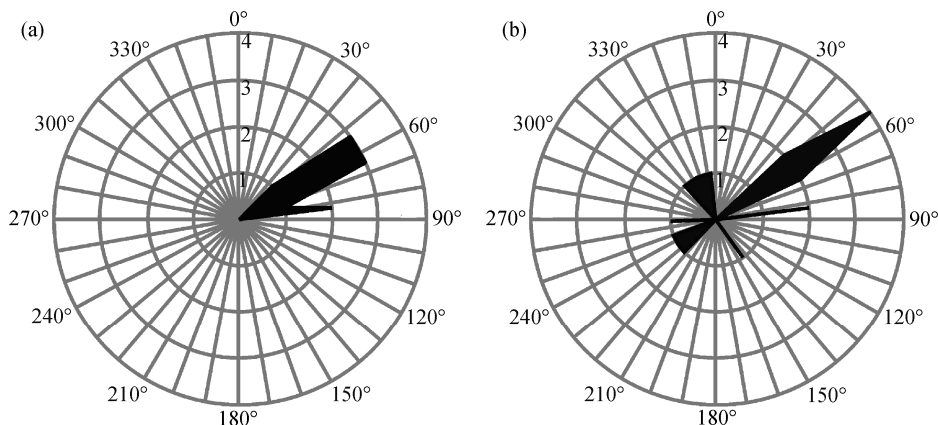
V类 锥体呈坑形, 熔岩流塌陷成湖, 火山产物以熔岩流为主。地池周围为灰黑色柱状玄武岩, 节理发育, 形成于中更新世。

同时, 阿尔山火山区发育大面积的熔岩流地貌。全新世熔岩多保留凝固结时形成的流动构造, 前端一般呈舌状, 遥感影像显示表面凹凸不平、颜色深浅不一的斑状和条状结构, 为结壳熔岩、熔岩冢和熔岩丘等微地貌, 边界清晰, 中更新世之前的熔岩发生不同程度的风化, 表层被第四纪沉积物覆盖, 微地貌边界不清晰。熔岩流还阻塞哈拉哈河河道, 形成多个火山堰塞湖, 如杜鹃湖、鹿鸣湖等(图2(d))。

4 断裂与火山锥的成因

利用阿尔山地区火山锥遥感解译图及DEM定量分析结果, 获得火山锥长轴朝向10个数据和马蹄形火山口缺口朝向18个数据(表3)。

由于阿尔山地区火山都是第四纪以来喷发的, 成分相近, 可将火山口连接, 获得火山群走向。一般认为, 单个火山锥长轴的延伸方向及最大构造应力方向与火山群排列方向平行^[27]。如图2所示, 在阿尔山地区火山群中, 火山锥形态有椭圆形、似圆形等。在解译出的19个火山中, 10个火山锥呈椭圆形, 其长轴走向大致为NE向(图4(a)), 80%的锥体长轴走向介于45°~75°之间, 中值为58.5°, 与NE向排列的小东沟火山-十号沟盆地火山-岩山-高山火山链走向平行; 其余8个火山锥体呈近圆形, 还有



(a) 火山锥长轴朝向; (b) 火山锥马蹄形缺口朝向。数字1~4表示样本数

图4 阿尔山地区火山长轴和火山锥马蹄形缺口朝向玫瑰图

Fig. 4 Rose diagram of the direction of the long axis direction and horseshoe-shaped craters of the elliptical volcanic cones in Aershan region

1个为玛珥火山,不考虑长轴走向因素。

一般认为,马蹄形火山口有以下3种成因:1)玄武质岩浆中密度较小的挥发分引发爆破式喷发,导致后期熔岩沿先期形成的锥底溢流,破坏锥体,形成马蹄形火山口;2)岩浆沿断裂的裂隙喷发,沿裂隙方向形成马蹄形火山口;3)前面两种成因复合形成马蹄形火山口。第一种成因的马蹄形火山口在所有火山喷发形式中都可能出现,火山口朝向也具有随机性;第二种成因的马蹄形火山口的朝向则有优势方位,可以通过统计多个马蹄形火山口朝向来推测基底断裂走向^[28]。

阿尔山地区火山锥多为马蹄形,其缺口朝向有一定的规律,主要为NE向,也见SW向和NW向(图4(b))。利用玫瑰花图,分别统计这3个象限内缺口朝向的角度,结果表明,第一象限内缺口朝向中值为56.5°,与NE向排列的火山群走向平行;第三象限内缺口朝向的角度中值为242°,与第一象限内缺口朝向角度中值相差约180°,也与NE向排列的火山群走向平行;第四象限内火山锥朝向中值为336°,与NW向断裂走向平行。根据统计结果,推测马蹄形火山锥缺口朝向与断裂相关,第二种成因在阿尔山地区火山形成过程中起主导作用。

阿尔山地区火山锥长轴走向及马蹄形火山缺口朝向统计结果表明,多数早期火山口垣西南侧高,东北侧低,产生这种现象的原因是锥体的东北侧应力较薄弱,成为熔岩流选择的优先溢出方向;晚期形成的火山则保留环形坑,呈漏斗状,说明火山主要由斯通博利式的爆破喷发形成,也说明岩浆喷发方式受到NE向断裂延伸方向的影响。马蹄形火山锥的形成过程为:岩浆沿火山通道运移到地表附近,大量的挥发分从岩浆中析出,或者由于地下流体汽化,产生巨大的爆破力,爆炸喷出大量火山碎屑;火山碎屑受重力作用,降落在岩浆通道周围,堆积形成火山锥体;从火山通道喷出的火山碎屑受地表相对薄弱的NE向断裂带控制,导致其喷出方向具有一定的方向性;挥发分喷出之后,岩浆开始宁静式的溢流喷发,并储集在火山口内,当达到一定容量后,沿应力薄弱的北东方向或较低矮东北侧火山垣溢出,形成马蹄形火山缺口。

5 结论

本文基于资源三号卫星影像和地理空间数据云平台ASTER GDEM(V1)的数据,利用GIS软件

平台,对阿尔山地区第四纪火山群的地质地貌进行遥感解译;计算火山地貌的起伏度和坡度,定量地分析地貌单元的特征;统计火山锥长轴指向及马蹄形缺口朝向,推断断裂与火山锥形成的关系。主要结论如下。

1) 遥感解译出19个火山锥,解译成功率为95%。其中,10个椭圆形火山锥的长轴走向大致为NE向,80%的锥体长轴走向介于45°~75°之间,中值为58.5°,与NE向排列的小东沟火山-十号沟盆地火山-岩山-高山火山链走向平行。

2) 通过DEM定量分析,获得不同火山锥体的形态特征,阿尔山地区火山机构地貌可分为5种类型。该区NE向火山带地形起伏度较大,低位中山,占39.61%,低位低山次之,占36.24%。火山锥体与熔岩台地的坡度差别较大,多为晚期火山,火山锥在坡度分布图中呈环状和马蹄状。马蹄形缺口主要朝向为NE向,也有SW向和NW向,NE向与SW向马蹄形缺口的角度中值相差约180°,NW向马蹄形缺口几乎平行于NW向断裂。

3) 中生代的基底断裂使该区形成NE走向的脆弱裂隙带,控制火山的喷发和展布,并最终影响地表火山锥的分布和地貌形态。

致谢 感谢北京大学武弘麟副教授在野外考察过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 刘嘉麒. 中国东北地区新生代火山岩的年代学研究. 岩石学报, 1987, 3(4): 23-33
- [2] 白志达, 田明中, 武法东, 等. 焰山、高山——内蒙古阿尔山火山群中的两座活火山. 中国地震, 2005, 21(1): 113-117
- [3] 白志达, 谭庆伟, 许桂玲, 等. 内蒙东部晚第四纪火山活动与新构造. 岩石学报, 2012, 28(4): 1099-1107
- [4] 樊祺诚, 赵勇伟, 李大明, 等. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山分期: K-Ar年代学与火山地质特征. 岩石学报, 2011, 27(10): 2827-2832
- [5] 赵勇伟, 樊祺诚. 大兴安岭哈拉哈河-绰尔河第四纪火山岩地幔源区与岩浆成因. 岩石学报, 2012, 28(4): 1119-1129
- [6] Ho K, Ge W, Chen J, et al. Late Cenozoic magmatic transitions in the central Great Xing'an Range, Northeast China: geochemical and isotopic constraints on petrogenesis. Chemical Geology, 2013, 352: 1-18

- [7] Pan S, Zheng J, Griffin W L, et al. Nature and evolution of the lithospheric mantle beneath the eastern Central Asian Orogenic Belt: constraints from peridotite xenoliths in the central part of the Great Xing'an range, NE China. *Lithos*, 2015, 238: 52–63
- [8] Sun C, Liu Q, Wu J, et al. The first tephra evidence for a Late Glacial explosive volcanic eruption in the Arxan-Chaihe volcanic field (ACVF), northeast China. *Quaternary Geochronology*, 2017, 40: 109–119
- [9] Németh K, Wu J, Sun C, et al. Update on the volcanic geoheritage values of the Pliocene to Quaternary Arxan-Chaihe volcanic field, Inner Mongolia, China. *Geoheritage*, 2017, 9(3): 279–297
- [10] 王丽丽, 田明中, 白志达. 内蒙古阿尔山-柴河火山地质遗迹类型及其特征. *资源与产业*, 2013, 15(1): 89–95
- [11] Wang L, Tian M, Wen X, et al. Geoconservation and geotourism in Arxan-Chaihe volcano area, Inner Mongolia, China. *Quaternary International*, 2014, 349: 384–391
- [12] 汤吉, 王继军, 陈小斌, 等. 阿尔山火山区地壳上地幔电性结构初探. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 196–202
- [13] Liu Y, Niu F, Chen M, et al. 3-D crustal and uppermost mantle structure beneath NE China revealed by ambient noise adjoint tomography. *Earth & Planetary Science Letters*, 2017, 461: 20–29
- [14] Guo Z, Chen Y J, Ning J, et al. Seismic evidence of on-going sublithosphere upper mantle convection for intra-plate volcanism in Northeast China. *Earth & Planetary Science Letters*, 2016, 433: 31–43
- [15] 解惠, 田景春, 武利文, 等. 内蒙古阿尔山地区成矿花岗岩形成时代及其找矿意义. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2011, 41(5): 1432–1440
- [16] Liu J, Han J, 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. *Tectonophysics*, 2001, 339(3): 385–401
- [17] 王今飞. 遥感卫星图像中线性地质特征的自动提取. *第四纪研究*, 2000, 20(3): 252–258
- [18] 付碧宏, 二宫芳树, 董彦芳, 等. 三维卫星遥感图像生成技术及其在第四纪构造地貌研究中的应用. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 189–196
- [19] 王刚, 陶晓风, 伊海生, 等. 四川盆地西南缘雅安-名山地区青衣江古河道的变迁及蒙顶山背斜的隆起. *第四纪研究*, 2010, 30(4): 779–790
- [20] 李勋, 杨环, 殷宗敏, 等. 基于DEM和遥感影像的区域黄土滑坡体识别方法研究. *地理与地理信息科学*, 2017, 33(4): 86–92
- [21] 张柳毅, 李霓, 赵勇伟, 等. 腾冲火山区地形地貌特征及断裂制约关系——卫片与DEM解译的认识. *地震地质*, 2012, 34(4): 755–767
- [22] 刘少峰, 王陶, 张会平, 等. 数字高程模型在地表过程研究中的应用. *地学前缘*, 2005, 12(1): 303–309
- [23] 李福田, 初禹, 仲伟成. 内蒙古甘奎、诺敏—毕拉河火山群遥感解译的新认识. *国土资源遥感*, 2003, 15(3): 20–24
- [24] 高玄彧. 地貌基本形态的主客分类法. *山地学报*, 2004, 22(3): 261–266
- [25] 龚丽文. 内蒙古达里火山群火山地质特征及地貌解译分析[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2015
- [26] 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 等. 大兴安岭哈拉哈河-淖尔河地区第四纪火山活动初步研究. *岩石学报*, 2008, 24(11): 2569–2575
- [27] 江英豪, 王成虎, 刘卓岩, 等. 五大连池火山区域古应力场的初步研究——基于火山口模式反演. *工程地质学报*, 2016, 24(增刊 1): 160–166
- [28] 赵勇伟, 樊祺诚, 白志达, 等. 大兴安岭诺敏河-奎勒河地区第四纪火山活动研究. *中国科学: 地球科学*, 2013, 43(9): 1464–1473