

# 基于THEMIS 图像分析的火星Icaria Fossae 地区 古老火山地貌特征与形成时间

杨捷, 肖龙, 黄俊, 侯莹玲

(中国地质大学地球科学学院, 武汉 430074)

**摘要** Icaria Fossae 地区位于火星 Tharsis 火山高原的南部。通过对高分辨率的 THEMIS 图像分析, 在该区新识别出了 20 多个小火山, 它们的直径为 45~100 km, 高度为 800~3 000 m。通过对这些火山建造表面撞击坑直径一频率统计的分析, 认为这些火山年龄约 4 Ga。这是到目前为止在火星上发现的最古老的火山。与火星上其他地区相比, 这些火山表现出后期被强烈改造的特征, 其间发育丰富的撞击坑、熔岩流、河道等地质现象。

**关键词**: 火星; Icaria Fossae; 数坑定年; 火山

**中图分类号**: P 185.3

**文献标志码**: A

**文章编号**: 1000-7849(2010)04-0051-05

火山活动是行星释放其内部热量的过程, 它是天体内部地质作用的外在表现, 因此火山是认识天体内部特征的窗口<sup>[1-3]</sup>。对于陨石与表面岩石样品都稀缺的火星来说, 通过对其火山的研究来了解它的表面与内部物质特征显得尤为重要。

火星是一个火山的世界<sup>[3]</sup>, 其大部分火山是由玄武岩构成的盾形火山, 以及火山灰锥、熔岩流、熔岩管和小盾形火山。由于火星上没有板块活动, 火山活动能不断累积形成大型火山, 因此这些火山景观的规模都比地球上同类的火山要大<sup>[4]</sup>。如高 24 km 的 Olympus 火山以及直径约 2 000 km 的 Alba 火山, 它们是太阳系中最大的几个火山。火星的火山活动开始于早诺亚纪 (>3.8 Ga), 一直持续到晚亚马逊纪 (0.1 Ga)。诺亚纪是大规模火山活动同时伴随着频繁撞击的时期, 西方纪时严重陨击减退, 火山活动就逐渐形成了广延的熔岩平原。亚马逊纪的陨击成坑速率低但延续到了现在, 火山活动仍然持续, 一些大型火山(如 Olympus 等)就在此时期最终形成<sup>[5-9]</sup>。根据行星热演化的一般规律, 早期的火山活动更强, 火山地貌也更加发育。但关于火星上早诺亚纪的火山尚未见报道, 笔者重点对这一现象进行研究, 并利用最新的 THEMIS 火星探测图像数据, 对南部高原 Icaria Fossae 地区的一些火山建造进行表面撞击坑的直径一频率统计分析, 试图找到古老的火山。

## 1 研究区位置及地形概况

Icaria Fossae 地区位于火星表面最大的火山高原, 即 Tharsis 火山高原的南部, 北侧紧挨 Daedalia 熔岩平原。该区分布有丰富的撞击坑与火山高地, 以及年轻的火山熔岩流。研究区的东边发育由 Syria 向 Tharsis 南部发散的断裂系统, 其中的 Claritas 大断裂将 Icaria Fossae 地区和 Syria 地区隔离开来。研究区中心位置为 239.81°E, -32.81°N, 区域面积约为  $4 \times 10^6 \text{ km}^2$  (图 1-A)。根据高分辨率的 THEMIS 图像分析, 在 Icaria Fossae 地区发现了 20 多个火山地貌 (图 1-B)。

## 2 火山地貌特征

THEMIS (热释光成像系统) 是 2001 年发射的“奥德赛”火星探测器 (Mars Odyssey) 上携带的主要设备, 通过分析可见光和红外光的光谱图像特征, 可以判断火星表面的物质分布情况。之前的红外多波段成像仪和激光测距仪, 都是对火星表面进行测量而绘制地形图, 它们的图像分辨率较低, 相比之下, THEMIS 则获得了更高的、覆盖火星全球的图像, 据此可以获得更加真实的火星图像<sup>[8-10]</sup>。因此 THEMIS 能够用来识别小尺度的火山地貌及其细微特征,

收稿日期: 2009-08-23 编辑: 杨勇

基金项目: 国家地质学理科基地班基金项目 (DXTZS 09001)

作者简介: 杨捷 (1987—), 男, 主要从事行星地质学方面的研究。

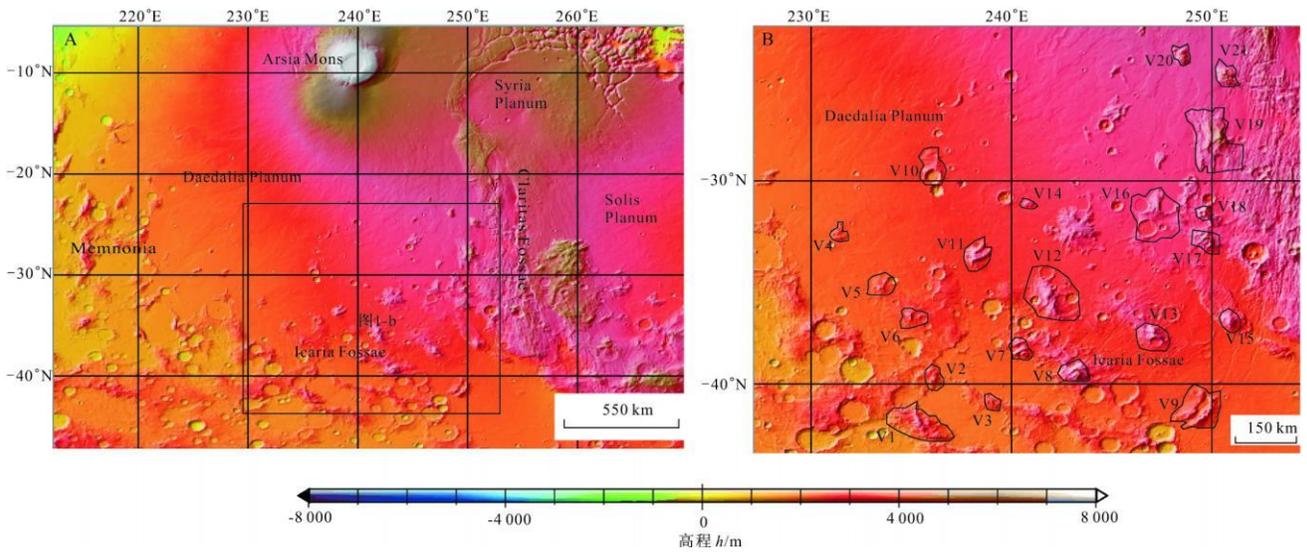


图1 研究区地理位置(A)和21个火山位置(B)

Fig. 1 Location of the study area (A) and some volcanoes (B)

注:图中标号区域对应表1中的21个火山,相应地理单元名称在图中已写明<sup>1)</sup>(MOLA/NASA)。

利用这些图像进行火山建造表面撞击坑直径-频率统计分析,所获得的年龄也将更加有说服力。

在Icaria Fossae地区分布着许多大大小小的火山,这些火山和火星上其他地区的火山一样,具有火山锥、熔岩流、熔岩管等火山地貌特征,这些火山景观的平均直径为45~100 km,高度为800~3 000 m,相对于Icaria Fossae地区北边的Olympus、Arisa等巨型火山来说,它们的规模较小。由于它们的形成时间早,火山被各种沉积物所覆盖,因此只露出了顶部和周围部分,这可能是它们规模小的原因之一。火山在形成后长期的地质历史时期中,经历了各种地质作用的改造,其顶部和周围发育了撞击坑、断裂、河道等地质现象,如V6火山(图2B),就是这些地质作用改造留下的痕迹。其间发育的熔岩流也并不是火山形成时的熔岩,而是被更年轻的来自北部Tharsis的其他晚期火山熔岩所覆盖。

火星上没有发育板块构造,不能形成类似地球上的安第斯山脉链、海沟、褶皱山系等地貌。其表面的主要构造形迹是火山、地堑、撞击和伸展性的断陷、裂谷等。少数地区分布的皱脊构造则是连续的低矮脊状构造,与本文描述的火山形貌完全不同。基于这些理论,结合区域周边的熔岩流、叶状悬崖(熔岩流峰)等特征判断这些穹窿构造属于火山。图2显示了Icaria Fossae地区一些典型的火山地貌特征:火山顶部与周边遍布撞击坑。这些特征表明火山的年龄较老,火山经历过撞击、构造作用、水流等多种地质改造。

从NE向的中央山脊、层状的熔岩流以及中间

高四周低的地形等高线就可以确定V5为火山地貌,它的高度为3 500 m,突起的相对高差为900 m,平均直径为70 km。熔岩流以NE向的中央山脊为界向两边往下流动。周围平原中覆盖着大量的熔岩流,从大区域的地质图可以看出,该类物质是由北向南流动的(图1),可能来自Tharsis火山群。通过该熔岩流与撞击坑的覆盖关系,可以大致判断出他们的新老关系。该火山分布了6个撞击坑,C1、C2、C3号撞击坑都是在周边熔岩流之前形成的(图像中坑内充满表面光滑的熔岩流)。C3号撞击坑由于面积较大(直径约20 km),海拔较C1、C2号高,坑底粗糙,推断撞击坑中曾经被水体充填,后经历蒸发作用形成大量类似‘泥裂’的构造表面。C4号撞击坑由于坑内没有存在被改造的现象,因此可以判断它的形成时间可能较晚,或者由于其高度偏大,后期的熔岩流或流水未能灌入到该撞击坑内。与之相似,C5、C6号撞击坑由于海拔较高,流体不可能流过,所以无法判断它与流体的新老关系。故它们之间由老到新的顺序大致为:V5火山;C1、C2、C3号撞击坑;C4、C5、C6号撞击坑(图2A)。

V6号火山发育在V5号火山的附近,它经历的后期改造作用较强烈,残留NW、NE、SW向的3条山脉,熔岩流顺着山脉向SW方向流动,导致火山的原貌变得模糊,从地形剖面线中可以推测它为火山地貌。它的高度为3 700 m,火山突起的相对高差为800 m,平均直径为60 km。4个大型的撞击坑成弧形分布在V6的东南翼,他们的平均直径达16 km,其他一些直径在5 km左右的小型撞击坑则分

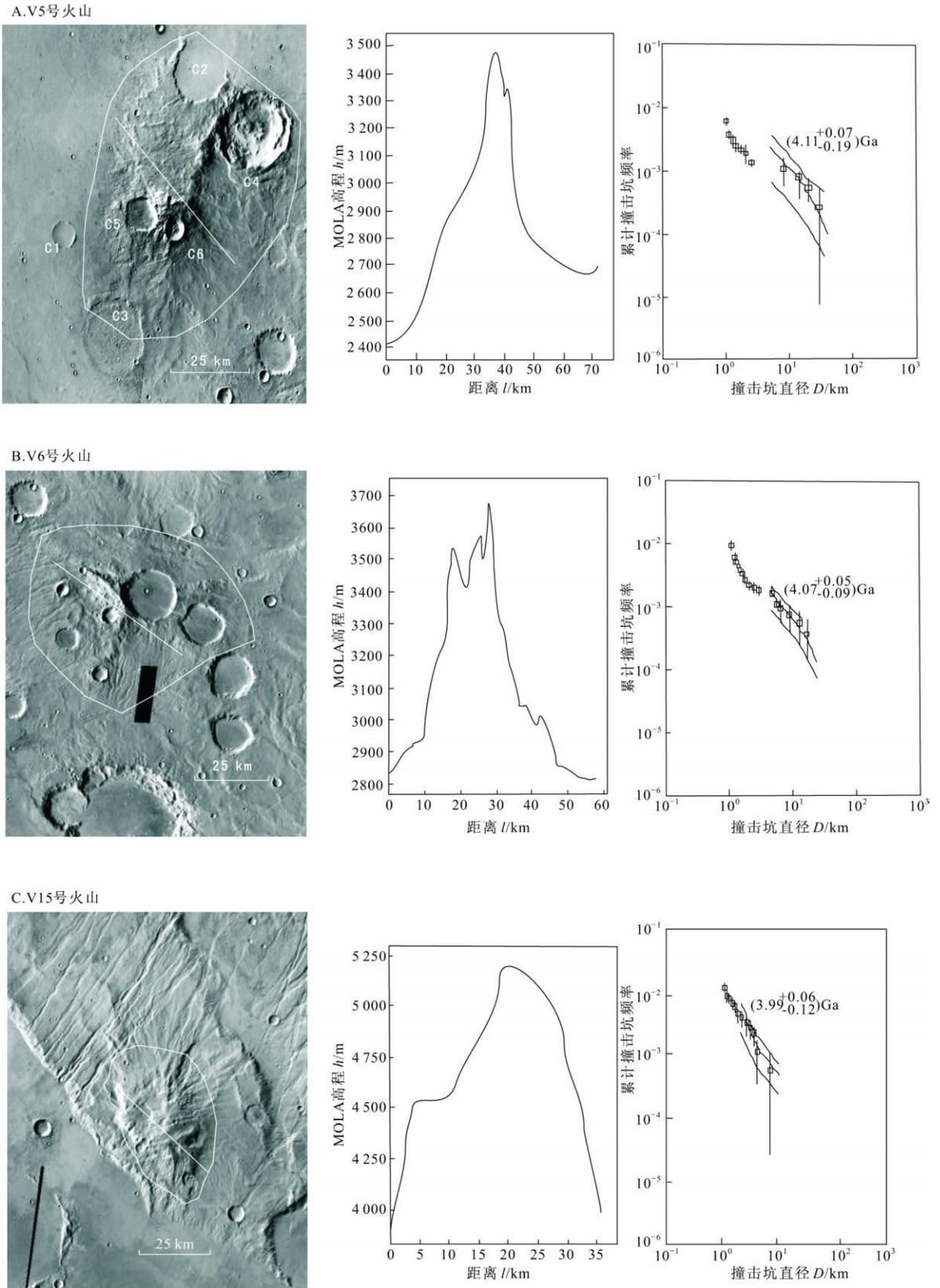


图 2 V5、V6 和 V15 火山形态特征及年龄图

Fig. 2 Morphology of three volcanoes and their age

注:图中黑色区域为没有卫星数据的区域,V5、V6、V15 为火山编号,C1~C6 为撞击坑编号,每排从左至右依次为:火山图像 (THEMIS)、高程剖面 (MOLA) 和年龄图,火山的详细数据参见表 1。

表1 Icaria Fossae 地区一些典型的火山形态数据与年龄统计

Table 1 Morphological and age of some volcanoes in Icaria Fossae

编号	经度/ (°)	纬度/ (°)	高程 h/m	相对高差 $\Delta h/m$	平均直径 D/km	年龄 t/Ga
V 1	236.24E	-42.34N	4 500	2 000	60	3.91
V 2	236.13E	-39.49N	3 550	1 300	80	3.86
V 3	238.57E	-40.46N	3 350	1 000	50	3.94
V 4	231.25E	-32.32N	3 375	875	40	4.07
V 5	233.26E	-35.21N	3 250	900	70	4.11
V 6	235.12E	-36.37N	3 150	800	60	4.07
V 7	240.34E	-38.50N	4 250	1 250	60	3.97
V 8	243.36E	-39.53N	6 500	2 800	55	3.97
V 9	249.28E	-41.63N	3 900	1 400	90	3.82
V 10	236.11E	-29.26N	4 000	1 750	90	4.34
V 11	238.22E	-33.72N	5 000	2 000	75	4.07
V 12	242.00E	-35.90N	5 500	2 000	100	3.98
V 13	247.13E	-37.57N	5 500	2 350	80	4.09
V 14	240.89E	-31.13N	4 100	600	40	3.80
V 15	250.85E	-36.79N	5 250	1 250	70	3.99
V 16	247.31E	-31.17N	5 700	1 600	75	4.13
V 17	249.45E	-32.95N	6 250	2 250	90	4.10
V 18	249.36E	-31.37N	6 250	2 000	45	4.05
V 19	250.50E	-27.92N	7 500	3 000	90	3.95
V 20	248.50E	-23.78N	6 250	1 350	80	3.97
V 21	248.26E	-24.13N	6 250	1 500	65	4.09

布在火山的另一侧(图 2-B)。

V 15 号火山的表面改造弱于 V 5、V 6 号火山,保留了火山的大部分形态。它的规模较大(与地球上同类型的火山相比),坡度较小,延伸面积较广,因而常常被称作盾形火山。它的高程为 5 250 m,突起的相对高差为 1 250 m,延伸的平均直径达 70 km。其上的撞击坑较小(小于 5 km)。火山的周围分布着许多以山顶为中心的放射状熔岩河道或流水河道,说明这些火山曾经被冰雪覆盖,这些冰雪的消融形成了放射状的河道(图 2-C)。

### 3 火山的形成年龄

撞击坑是由小天体(小行星、彗星、陨石等)冲击行星表面形成的一种地形标志或构造地貌单元。在月球、土星的卫星等一些较小且没有大气圈的行星上,撞击坑是其表面主要的地貌单元之一。火星、金星、水星等行星上亦分布着数量不等的撞击坑。基于大多数火星坑为撞击起源这一假设前提,用火星坑的直径  $D$  为横坐标,直径大于  $D$  的累积撞击坑数  $p(\geq D)$  为纵坐标作图(图 2),可得火星坑的直径—累积坑数图,它遵守一定的指数律。单位面积的撞击坑密度越高,表明该地区或地质单元的相对地质年代愈老,反之则较年轻,因此撞击坑密度能应用于行星表面不同地质单元相对地质年代的推断<sup>[11-13]</sup>。由于火星没有全球范围的板块活动,后期

的地质改造作用较小,所以用此方法可以测出特定区域的年龄,尤其是它们的相对年龄。火星各个时代的标准测年谱线前人已经给出<sup>[14]</sup>,我们只需将直径、面积和累积撞击坑数目,投入图中就可以确定特定区域的年龄。

本次研究我们选取了火星南半球 Icaria Fossae 地区的撞击高地为研究对象,在研究区内识别出了 20 多个表面密布撞击坑的小火山建造。运用 SAODS (美国史密松天文台开发的天文图像处理软件,详见参考文献 [15])进行了撞击坑直径与累计数目频率的统计,再将得到的数据在 Craterstats 软件(德国柏林自由大学开发的数坑定年软件,详见参考文献 [16])中投图得出这些火山的年龄(表 1)。

### 4 讨论

通过对火星表面撞击坑密度的研究,在 Tharsis 火山高原的南部识别出了 20 多个火山,它们与断裂系统交错在一起,其间残留古河道的痕迹,覆盖着多期的熔岩流。这些特征很好地印证了前人对诺亚纪火星地质演化的推断:严重陨击,大规模火山活动,后期液态水泛滥开掘出很多小的谷网,西方纪与亚马逊纪的熔岩流过该区域形成熔岩的多期覆盖特征等<sup>[17-19]</sup>。在我们的研究结果中这些火山中最年轻的为 3.8 Ga,最古老的为 4.34 Ga,属于火星演化早期的诺亚纪。与 Tharsis 火山高原比较 Icaria Fossae 周围的地质体则显得相对年轻:Daedalia 平原为早亚马逊纪,Claritas 为晚西方纪,部分地质单元为晚亚马逊纪<sup>[20]</sup>。在诺亚纪早期火星刚形成不久,热演化作用非常强烈,各种类型的大量陨落体撞击火星产生众多的陨击坑,此时也是大规模的火山活动时期,发育众多火山,但后期沉积物长期积累掩埋了大部分火山。由于 Icaria Fossae 座落在 Tharsis 大火成岩省高地的南部,从地貌分析可知它经历过动力抬升、水系、裂谷、火山作用以及溢流熔岩喷发等构造—岩浆事件,因此推断它与地形相似的蒙古—西伯利亚南部平原一样存在着类似的与岩浆作用有关的热液系统。这些热液系统和火山的热液活动,再加上温湿的气候与液态水,都可以为类地生命的形成提供条件,这就为在火星的诺亚纪形成与地球早期形态一样的低微生命提供了可能。

### 参考文献:

- [1] Rosaly M C, Tracy K P. *Volcanic worlds: Exploring the solar system's volcanoes* [M]. New York: Springer Verlag, 2004: 97-109.
- [2] Bell J. *The martian surface: Composition, mineralogy, and physical properties* [M]. New York: Cambridge University

Press, 2008, 302—304.

- [3] Carr M H. *The surface of Mars* [M]. New York: Cambridge University Press, 2006, 43—74.
- [4] 肖龙, Greeley Ronald, 曾佐勋, 等. 比较行星地质学的研究方法、现状和展望[J]. 地质科技情报, 2008, 27(3): 1—12.
- [5] 胡中为, 徐伟彪. 行星科学 [M]. 北京: 科学技术出版社, 2008, 221—222.
- [6] Mars Group Niels Bohr Institute. Evolutionary history of Mars [EB/OL]. University of Copenhagen. [2009-07-14]. <http://www.nbi.ku.dk/forskning/grupper/mars>.
- [7] [2009-08-11]. <http://mola.gsfc.nasa.gov/images.html>.
- [8] Christensen P R, Gorelick G L, Mehall K C, et al. THEMIS Public Data Releases [EB/OL]. Planetary Data System node, Arizona State University. [2009-07-11]. <http://themis.data.asu.edu>.
- [9] Kenneth S E, Michael C M. New views of Mars aeolian activity, materials, and surface properties: Three vignettes from the Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(E1): 1 623—1 650.
- [10] Christensen P R, Jakosky B M, Kieffer H H, et al. The Thermal Emission Imaging System (THEMIS) for the Mars 2001 Odyssey Mission [J]. *Space Science Reviews*, 2004, 110, 85—130.
- [11] 肖龙, 何琦, 黄定华, 等. 太阳系天体的火山作用及其比较行星学意义[J]. 地质科技情报, 2008, 27(1): 20—30.
- [12] 郑丽, 冯金良, 张稳. 行星撞击坑分形及分维数意义探讨[J]. 河北师范大学学报:自然科学版, 1998, 23(3): 347—351.
- [13] Werner S. The global martian volcanic evolutionary history [J]. *Icarus*, 2009, 201, 44—68.
- [14] Lunar and Planetary Institute. *Basaltic volcanism on the terrestrial planets* [M]. Provided by the NASA Astrophysics Data System, 1981, 1 082—1 083.
- [15] SAO Image DS<sup>9</sup>, developed by Smithsonian Astrophysical Observatory [EB/OL]. [2009-06-12]. <http://heavwww.harvard.edu/RD/ds9>.
- [16] Craterstats. Planetary Sciences and Remote Sensing at Freie Universität Berlin [EB/OL]. [2009-06-12]. <http://hrseview.fu-berlin.de/craterstats.html>.
- [17] Xiao L, Smith M, Huang J, et al. Volcanic features on the Syria-Thaumasia block, Mars: Implications for ancient martian volcanology [C] // Anon. *4th Lunar and Planetary Science Conference*. The Woodlands, Texas: Lunar and Planetary Institute, 2009, 1026.
- [18] Dohm J M, Tanaka K L. Geology of the Thaumasia region, Mars: Plateau development, valley origins, and magmatic evolution [J]. *Planet. Space Sci.*, 1999, 47(3/4): 411—431.
- [19] Greeley R, Christensen P R. Evidence for an ancient impact basin in Daedalia Planum, Mars [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990, 95(B7): 10 729—10 741.
- [20] James M D, Kenneth L T, Trent M H. Geologic map of the thaumasia region, mars [R]. Denver: Department of the Interior US Geological Survey, 2001.

## Ti ming and Volcanic Features of the Icaria Fossae Region on Mars: THEMIS Image Analysis

YANG Jie, XIAO Long, HUANG Jun, HOU Yinlin

(Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The Icaria Fossae region is located in the southern part of the Tharsis bulge. More than  $20_s$  small volcanoes are identified through THEMIS high resolution image analysis. They are 45—100 km in diameter and are 800—3 000 m high. Crater counting suggests the age of these volcanoes is about  $4 \text{ Ga}$ , which are the oldest volcanoes found on Mars until now. These volcanoes were strongly modified compared to other regions on Mars. There are many typical geological phenomena in Icaria Fossae region such as impact craters, lava flows, fluvial valleys, etc. The study of this area can help the understanding of the evolution of volcanic geological events and other related geological events on Mars.

**Key words:** Mars; Icaria Fossae; crater counting; volcano