

doi:10.3799/dqkx.2010.030

# 火星表面沙丘中冲沟的成因及 对撞击坑壁冲沟成因的启发

岳宗玉<sup>1</sup>, 谢红接<sup>2</sup>, 刘建忠<sup>3</sup>, 欧阳自远<sup>3</sup>

1. 中国科学院遥感应用研究所, 北京 100101

2. Department of Geological Sciences, University of Texas at San Antonio, Texas 78249, USA

3. 中国科学院国家天文台, 北京 100012

**摘要:** 借助于 15 幅高分辨率的 HiRISE 影像与 107 幅 MOC 影像, 对火星表面撞击坑壁与沙丘中出现的非常年轻冲沟形态特征进行了详细研究, 并据此检验冲沟成因假说。影像特征分析结果首先支持沙丘中冲沟是由液态水携带泥沙冲刷而成的理论, 而撞击坑壁出现的多边形土证实火星表面下冰的存在, 且在适当的条件下可转变为液态水形成冲沟。

**关键词:** 火星; 冲沟; 沙丘; 遥感地质; 摄影测量。

中图分类号: P185.3; P627

文章编号: 1000-2383(2010)02-0291-11

收稿日期: 2009-03-15

## Potential Origination of Gullies Developed on Sand Dunes and Its Implications to Gullies on Crater Rims

YUE Zong-yu<sup>1</sup>, XIE Hong-jie<sup>2</sup>, LIU Jian-zhong<sup>3</sup>, OUYANG Zi-yuan<sup>3</sup>

1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. Department of Geological Sciences, University of Texas at San Antonio, Texas 78249, USA

3. National Astronomical Observatories of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China

**Abstract:** Mars gullies, the very young features exposed on crater rims and sand dunes, are studied in detail using 15 HiRISE images and 107 MOC images in this research, and the hypotheses of gully origination are examined. The results support the hypothesis that the gullies were formed by the erosion of liquid water that carried sand particles. And the existence of polygonal shape on crater walls suggests that water ice maybe located on Mars subsurface, which can melt to liquid water and produce gullies.

**Key words:** Mars; gully; sand dunes; remote sensing geology; photogrammetry.

火星表面的冲沟是在 2000 年通过火星全球勘探者号卫星 (Mars Global Surveyor, 简称 MGS) 携带的火星轨道相机 (Mars Orbiter Camera, 简称 MOC) 首先发现的 (Malin and Edgett, 2000)。由于它们是火星表面一种很年轻的现象, 因而迅速成为火星研究的一个热点 (Costard *et al.*, 2007; Mangold *et al.*, 2008)。本研究将这些冲沟分成两种类型: I 型冲沟主要分布在撞击坑壁中, 在撞击坑的中央丘、火星表面的山谷等地形中也可以出现, 它由沟

头、沟谷以及沟尾 3 个部分组成; II 型冲沟分布在沙丘中, 从沙丘顶部延伸至底部或者中途消失, 它主要表现为一条细长的沟渠, 在其源头通常分布一些小黑点; II 型冲沟的沟头没有出现较大的塌陷, 大多数沟谷逐渐变细, 沟尾没有明显的堆积物, 但在末端经常出现一个半环形隆起。

针对 I 型冲沟的成因有多种解释, 液态 CO<sub>2</sub> 说认为 CO<sub>2</sub> 是火星大气中主要的成分, 在火星表面下 100 m 深处压力达到  $5.2 \times 10^5$  Pa 时以液态形式存

在,当火星由冬季变为夏季时,液态  $\text{CO}_2$  冲破撞击坑壁形成冲沟(Musselwhite *et al.*, 2001);浅层地下水说认为火星表面下大约 100 m 深处存在着两层很薄的粘土层,这两层粘土层形成了大约 10 m 厚的地下水储蓄层;由于地热的作用,这里的水以液态形式存在.在撞击坑壁上,储蓄层被冰碛物所封闭,当火星轨道发生变化以致火星表面温度降低时,火星表面的  $0^\circ\text{C}$  等温线便向蓄水层内侧移动,这样便引起蓄水层更多的孔隙压力,当压力足够大时,就引起冰碛层的破裂,使液态水喷涌而出,形成了冲沟(Mellon and Phillips, 2001).融雪说认为在最近 10 万年至 1 万年中,火星轨道发生了变化,水体由极地地区逐渐转移到中纬度地区,在中纬度地区形成了一个富水的含雪层,冲沟就是在这些含雪层的撞击坑壁上形成的.这种理论的主要依据是在一些冲沟地区发现了融雪残留物(Christensen, 2003).深层地下水说认为火星表面存在着冰,早期的撞击过程将这些冰带到了火星数千米深处,由于热流作用固态冰融化成液态水,并且上升冲出表面形成了冲沟(Gaidos, 2001).融冰说认为火星表面的冲沟与东格陵兰的冲沟非常相似,指出虽然火星表面现在气压比较低,但是火星轨道在最近的改变可以提高火星表面的温度,从而使极地固态  $\text{CO}_2$  升华成气态以增加火星大气压力,并且高于  $0^\circ\text{C}$  的温度使火星表面的冰层出现融化,从而产生液态水形成冲沟(Costard *et al.*, 2002).此外还有另外解释认为这些冲沟是由于盐水的流动作用形成的,或仅仅是由于崩塌作用的结果(Bart, 2007),以及最近提出的风成说(Yue and Xie, 2007; Treiman, 2008).针对 II 型冲沟的形成主要有融冰说对其进行解释,由于其冲刷特征明显,而且根据相互交汇等特点可以排除固态物质侵蚀的假设,并且根据液态  $\text{CO}_2$  与液态水的物理性质差异排除液态  $\text{CO}_2$  冲刷的可能性.本文通过使用最新公布的 HiRISE 影像数据,从影像解译的角度对 II 型冲沟的微小特征进行了细致分析,进一步论证了液态水冲刷形成冲沟的可能性,并通过这两种类型冲沟的对比,指出 I 型冲沟可能也是由类似作用形成.

## 1 MOC 与 HiRISE 数据及其处理方法

MOC(Mars Orbiter Camera)是加载于 MGS(Mars Global Surveyor)上的一个有效载荷,它包括

一个窄角度相机(Narrow-Angle Camera)和 2 个宽角度相机(Wide-Angle Camera),都属于推帚式扫描仪(Malin *et al.*, 1991).窄角度相机(简称 NA,下同)采用的工作波段为 700 nm,波宽为 400 nm,所获取的影像数据的空间分辨率可达  $1.4\sim 11\text{ m/像元}$ ,覆盖范围可从  $2.8\text{ km}\times 2.8\text{ km}$  到  $2.8\text{ km}\times 500\text{ km}$ .它的主要目的是获取火星表面高空间分辨率的影像数据.两个宽角度相机(简称 WA,下同)的工作波段分别为 615 nm(红光波段)和 435 nm(蓝光波段),波段分辨率都是 30 nm,影像的空间分辨率为 250 m/像元左右,其主要目的是获取区域性的影像数据,为 NA 提供位置信息并进行影像纠正等(Malin *et al.*, 1992; [http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/viewInstrumentProfile.jsp?INSTRUMENT\\_ID=MOC&INSTRUMENT\\_HOST\\_ID=MGS](http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/viewInstrumentProfile.jsp?INSTRUMENT_ID=MOC&INSTRUMENT_HOST_ID=MGS)).MOC 数据可从 NASA 网站上免费下载,下载方式包括按照经纬度查询下载([http://pds-imaging.jpl.nasa.gov/cgi-bin/Atlas/search.pl?INSTRUMENT\\_HOST\\_NAME=MARS\\_GLOBAL\\_SURVEYOR&INSTRUMENT=MOC\\_WIDE\\_ANGLE&INSTRUMENT=MOC\\_NARROW\\_ANGLE](http://pds-imaging.jpl.nasa.gov/cgi-bin/Atlas/search.pl?INSTRUMENT_HOST_NAME=MARS_GLOBAL_SURVEYOR&INSTRUMENT=MOC_WIDE_ANGLE&INSTRUMENT=MOC_NARROW_ANGLE))、按照数据的卷标号查询下载([http://ida.wr.usgs.gov/d\\_access.htm](http://ida.wr.usgs.gov/d_access.htm))及马林空间科学系统提供的利用 Java 视图查询下载等([http://www.msss.com/moc\\_gallery/e13\\_e18/narrowangles.html](http://www.msss.com/moc_gallery/e13_e18/narrowangles.html)).新下载的 MOC 数据是一种压缩格式,没有坐标系,而且影像值是 DN 值;为达到后期的应用,必须做一系列的影像处理工作,这些工作可以在 USGS 所公布的行星遥感专业处理软件 ISIS(Integrated Software for Imagers and Spectrometers)(Kirk *et al.*, 2001; <http://isis.astrogeology.usgs.gov/IsisWorkshop/>)中完成.大致经过以下几个步骤:(1)将 MOC 数据导入 ISIS,这个过程同时伴随着解压缩原始数据;(2)为 MOC 数据添加 SPICE(Spacecraft and Planetary Ephemerides, Instrument C-Matrix and Event Kernel)文件(<http://naif.jpl.nasa.gov/naif/pds.html>),使 MOC 影像数据具有成像时 MGS 的位置、姿态等信息,以便于后期的处理;(3)将影像中的 DN 值转换成反射率值;(4)影像几何纠正.经过这些处理后,ISIS可以对这些影像进行镶嵌、测量以及滤波处理等后期操作.

HiRISE(High Resolution Imaging Science Experiment)是加载于 MRO(Mars Reconnaissance

Orbiter)上的一个有效载荷。MRO 在 2006 年 3 月接近火星,是目前仍在获取火星数据的一个重要探测器(Kirk *et al.*, 2007)。HiRISE 相机是一个推帚式成像系统,它由 14 个 CCD 探测元件组成,有 3 个波段,分别为蓝光波段(波长 500 nm,波宽 200 nm)、红光波段(波长 700 nm,波宽 300 nm)和近红外波段(波长 900 nm,波宽 200 nm)([http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/viewInstrumentProfile.jsp?INSTRUMENT\\_ID=HIRISE&INSTRUMENT\\_HOST\\_ID=MRO](http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/viewInstrumentProfile.jsp?INSTRUMENT_ID=HIRISE&INSTRUMENT_HOST_ID=MRO))。HiRISE 影像的空间分辨率根据 MGS 轨道高度的变化在 25 cm/像元和 32 cm/像元之间。HiRISE 数据有两种格式:其一为原始数据(EDR 格式),它的空间分辨率代表了真实影像分辨率(在 25 cm/像元和 32 cm/像元之间),它可以通过 ISIS 逐步处理,转换成带有坐标系信息且具有物理意义的影像值;另一种是经 HiRISE 数据处理中心使用 PDS\_JP2 软件处理后的数据(jp2 格式)([http://pirlwww.lpl.arizona.edu/software/PDS\\_JP2/PDS\\_IP2/](http://pirlwww.lpl.arizona.edu/software/PDS_JP2/PDS_IP2/)),它已经进行了辐射纠正、几何纠正

等处理,其空间分辨率在处理过程中重采样为 25 cm/像元和 50 cm/像元;这种格式的数据可以使用 ENVI 下的 HiRISE Toolkit 进行浏览和测量等([http://www.ittviz.com/envi/pdfs/ENVI\\_HiRISE.pdf](http://www.ittviz.com/envi/pdfs/ENVI_HiRISE.pdf); <http://www.ittviz.com/codebank/search.asp?FID=468>)。以上两种格式的数据既可以通过 HiRISE 的主页来下载([http://marsoweb.nas.nasa.gov/HiRISE/hirise\\_images/](http://marsoweb.nas.nasa.gov/HiRISE/hirise_images/)),也可以在 PDS 网站上下载(<http://pds-imaging.jpl.nasa.gov/search/index.jsp>)。

## 2 I 型冲沟的特征

### 2.1 I 型冲沟的分布特征

I 型冲沟在火星表面分布很有规律,它主要分布在南北两半球  $30^{\circ}$  和  $72^{\circ}$  之间。在北半球,从  $30^{\circ}$ N 至  $45^{\circ}$ N 随纬度的增大而逐渐增多,从  $45^{\circ}$ N 至  $72^{\circ}$ N 冲沟数量则逐渐减少,但在  $48^{\circ}$ N 至  $51^{\circ}$ N 又出现了另一个高峰。在分布的地形方面,有 84% 的冲

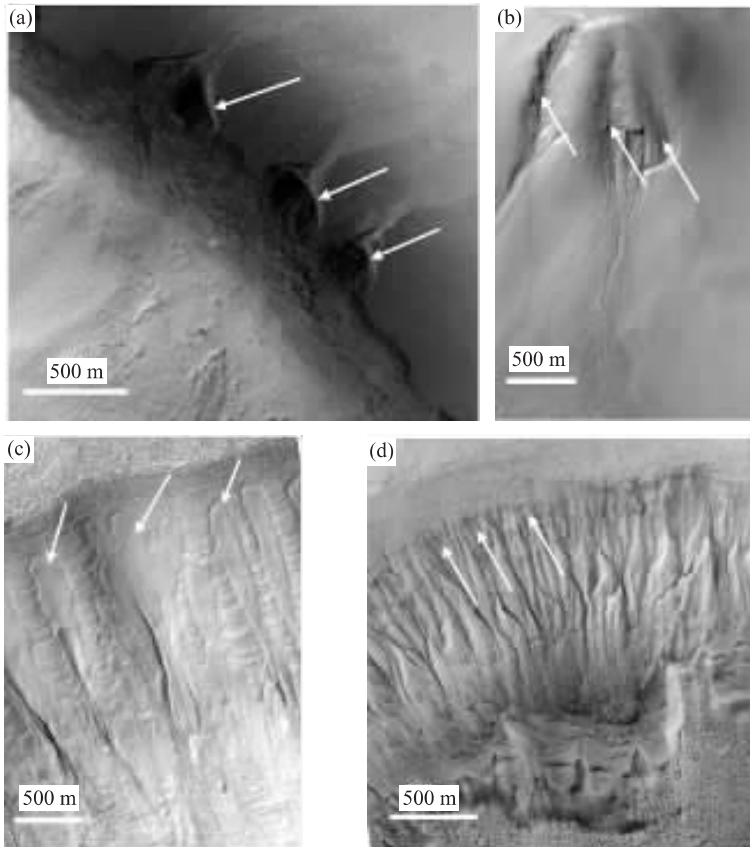


图 1 不同类型的沟头

Fig. 1 Alcoves of different types of gullies

a. 宽广型沟头; b. 狭长型沟头; c. 充填型沟头; d. 不明显型沟头。以上 4 幅图像均是据 MOC 影像,向上表示正北方向。a、b、c、d 图像使用的 MOC 影像编号分别为 m0302214. imq、m0705535. imq、m1101601. imq 和 e1004872. imq

沟出现在撞击坑中,其余的冲沟出现在山谷和其他地形中;在北半球冲沟出现的高度从 0.8 km ~ -5.4 km,但 95% 的冲沟分布在 0 m 以下;沟头多发育在地面下 100 m ~ 550 m 处,平均深度为 350 m. 冲沟可出现在各个方位的斜坡上,在 30°N ~ 44°N 面向赤道的斜坡上稍多一些,但是在 44°N ~ 58°N 几乎所有的冲沟出现在面向极地的斜坡上,在 58°N ~ 72°N,两个坡向的撞击坑壁上出现的冲沟数目几乎相等;冲沟分布的平均坡度为 28°(Heldmann *et al.*, 2007).

在南半球 32°S ~ 36°S,冲沟分布数量随纬度升高而逐渐增多,之后随纬度升高数量逐渐减少,在 60°S ~ 63°S 则没有发现冲沟,在 63°S ~ 72°S 冲沟数量再次随纬度升高而逐渐增多,在 69°S ~ 72°S 又达到另一个分布高峰. 同北半球相比,南半球的冲沟仅有 48% 出现在撞击坑壁上,在山谷和其他地形上的冲沟相对多些;南半球冲沟出现的高度从 2.0 ~ -5.0 km;32°S ~ 40°S 沟头出现的深度约为地面下 700 m,而 40°S ~ 72°S 沟头出现的深度为地面下 200 ~ 350 m;从 30°S ~ 44°S,大多数冲沟分布在面向赤道的斜坡上,从 44°S ~ 58°S,冲沟位于两种坡向的斜坡上,面向赤道的斜坡上稍多些,但在 58°S ~ 72°S,绝大部分冲沟出现在面向极地的斜坡上

(Heldmann and Mellon, 2004).

需要指出的是两个半球的冲沟往往呈群体性出现,因而冲沟的形成除了和纬度有关外,局部的环境也有很大影响.

## 2.2 I 型冲沟的形态特征

已经有大量的文献对 I 型冲沟的特征进行了解译(Edgett *et al.*, 2003; Márquez *et al.*, 2005; Balme *et al.*, 2006),这里只做一个简单介绍. I 型冲沟通常包括 3 个组成部分:沟头、沟谷和沟尾. 沟头是 I 型冲沟的发源地,它通常是一个由围墙和陡崖组成的凹坑,但由于局部地势条件等因素的影响, I 型冲沟的沟头也有不同的形式,总体来说有以下 4 类:(1)宽广型沟头. 这种类型的沟头多由一些冲积通道交汇发育,形成比较宽广的区域,有的宽度可达 2 ~ 3 km(图 1a);(2)狭长型沟头. 沟头宽度不大,但延伸较长,有的可达 4 ~ 5 km(图 1b);(3)充填型沟头. 从 MOC 影像上可以清楚地看到,此类冲沟早期具有沟头,但被后期的物质所充填,而且充填的界线很清晰(图 1c);(4)不明显型沟头. 主要受坡度较陡地形的影响,此类冲沟的沟头由于重力作用而不断塌陷,使沟头变得不明显(图 1d).

沟谷是物质转移的通道和侵蚀的产物,也是冲沟中最主要的部分,呈“V”字型连接了沟头和沟尾,

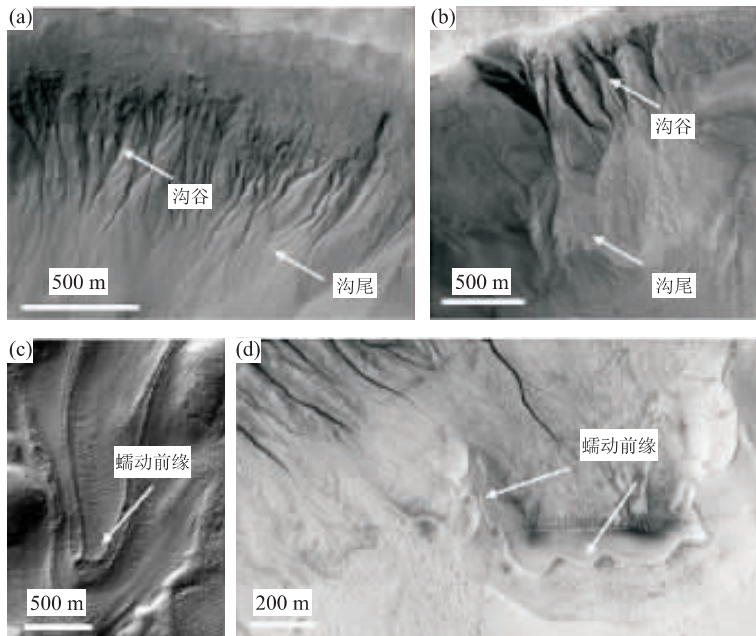


图 2 沟谷和沟尾

Fig. 2 Channels and aprons

a. 发育在土质松软的岩层上的冲沟,其沟谷发育密度大但规模小,沟尾也不明显,MOC 影像编号为 r1501265. imq; b. 发育在坚硬岩层上的冲沟,沟谷规模较大但数量较少,沟尾堆积了大量沉积物,MOC 影像编号为 e1002934. imq; c, d 表示冲沟中的蠕动现象,MOC 影像编号分别为 m1800897. imq, e1104033. imq. 以上图像向上为正北方向

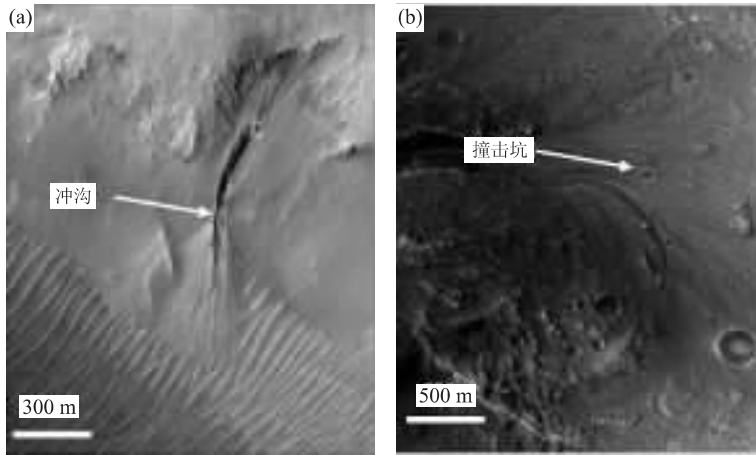


图 3 冲沟和其他地貌的覆盖关系

Fig. 3 The overlapping relationship between gullies and other features

a. 覆盖在风成地貌之上的冲沟, MOC 影像编号为 m0700752. imq; b. 在沟尾覆盖了一些小型撞击坑, MOC 影像编号为 2300984. imq. 各幅图像据 MOC 影像, 向上为正北方向

是发育在撞击坑壁表面的一种刻蚀构造(图 2a, 2b). 这些沟谷在延伸过程中相互交汇, 但也有出现中断现象, 一般认为沟谷的形态和岩层的性质有关, 而且相邻区域的冲沟通常起源于同一岩层 (Edgett *et al.*, 2003).

根据冲沟产出区域的岩性特征, 沟谷可以分为两类: 一类主要发育在土质松软的岩层上(图 2a), 另一类则发育在坚硬的岩层上(图 2b). 在土质松软的环境下发育的沟谷密度大, 相邻沟谷间隔小, 但沟谷发育细长而曲折; 在坚硬岩层中发育的沟谷分布区域狭小, 有的甚至只有数条沟谷, 但单个沟谷的规模相对较大且深, 呈明显的“V”字形深切在坚硬岩层之中, 并且向源侵蚀作用明显, 从而使沟头规模较大.

沟尾是以沟谷末端为顶点的锥形坡积物, 它主要分布在撞击坑的底部(图 2a, 2b). 根据局部地形的不同, 沟尾的形状差异很大. 有的以冲积通道末端为起点, 呈不规则三角锥状堆积在撞击坑底部, 而有的沟尾堆积作用不明显, 只有少量堆积物, 呈趾状分布在撞击坑底部. 除此之外, 还有一种蠕虫作用形成的沟尾, 它没有明显的沟谷和沟头, 但出现一个舌状蠕虫区, 而且蠕虫的前缘非常明显, 出现数条蠕虫作用形成的条纹(图 2c, 2d) (Hartmann, 2003).

沟头—沟谷—沟尾是冲沟的主要特征, 也是识别火星冲沟的主要标志 (Márquez *et al.*, 2005; Balme *et al.*, 2006).

### 2.3 I 型冲沟的形成年代

火星表面的冲沟是一种非常年轻的现象, 它可

以出现在较新的撞击坑中, 甚至覆盖在风成地貌之上(图 3a), 仅有极少数冲沟及其冲击物上面覆盖着小型撞击坑(图 3b). Reiss *et al.* (2004) 认为冲沟可能在最近 0.3~3 Ma 内形成的.

## 3 II 型冲沟的特征

Costard 等首先对 II 型冲沟进行了研究 (Gaidos, 2001), 通过对各种液态水源的推导与分析, 提出这种冲沟是由火星表面的冰融水的冲积作用形成的. Mangold *et al.* (2003) 和 Miyamoto *et al.* (2004) 分别根据不同介质的粘度与流速的关系等对其成因进行了分析. 这里我们使用最新获取的高分辨率影像对 II 型冲沟的相关特征进行分析, 这对解释其成因具有重要的意义.

### 3.1 II 型冲沟的沟头

相对于 I 型冲沟, II 型冲沟具有非常细小的、甚至不明显的沟头. 一些沟头形似卵圆形, 顶部稍尖, 在沟头壁上有一些鳞片状小的凹槽, 与山谷中水流冲积时形成的沟渠非常相似, 并且其反射率相对周围地区稍高而显得发亮(图 4a); 而有些沟头呈细枝状汇集一条冲沟, 甚至呈密集的支流状分布(图 4b). 总体上来说, 前一类沟头形成的沟谷稍宽, 而且较直, 而后一类沟头形成的沟谷非常弯曲且狭窄. 这些沟头通常起源于沙丘的顶部, 顺着斜坡向下延伸, 这一点和 I 型冲沟的沟头通常起源于撞击坑缘 100 m 以下的特征有所不同.



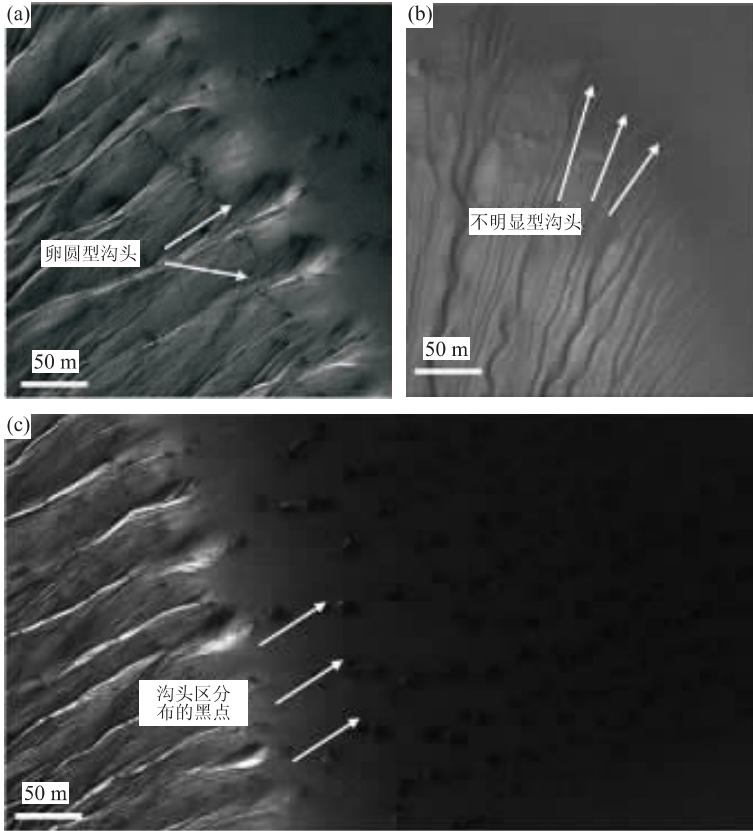


图 4 II 型冲沟的狭小沟头

Fig. 4 The narrow alcoves of types II gully

a. 卵圆型沟头, 影像编号为 PSP\_001440\_1225.jp2; b. 不明显型沟头, 影像编号为 PSP\_4196\_1325.jp2; c. 在 II 型冲沟的沟头分布的黑色点状区域, 其排列方向和冲沟方位一致, 影像编号为 PSP\_001440\_1225.jp2. 据 HiRISE 影像, 向上为正北方向

II 型冲沟的沟头通常分布着一些大小不一, 并随季节变化的黑点, 它们的排列方向和冲沟的方位相一致(图 4c); 而且这些小黑点也是一些非常细小的水沟的发源处, 虽然它们延伸很短, 但可以确凿地判断从这些小的黑点中曾有液态物质流出. 而且在冲沟的沟谷部分也有这些小的黑点, 有的被沟谷所穿透而一分为二, 在沟壁上的反射率比周围明显偏低, 而有的则被沟谷连接在一起, 因此这些黑点和冲沟的成因具有很大的联系.

### 3.2 II 型冲沟的沟谷

II 型冲沟的沟谷是其主要组成部分, 可延伸数百米. 如前所述, 具有明显沟头的沟谷较直(图 5a), 而那些没有沟头的沟谷要弯曲许多(图 5b); 而且在一幅影像上所出现的沟谷中, 宽度大的沟谷弯曲度要比细小的沟谷小一些, 可见沟谷形成时与引起刻蚀作用的物质移动速度有很大关系; 这些物质越丰富, 形成时的刻蚀速度就越快, 形成的沟渠就越直; 相反, 如果这种物质贫乏, 则形成时的刻蚀速度相对较小, 形成的沟渠较弯曲一些. 这些沟谷在延伸

过程中相互交汇, 交汇后的沟谷通常比其支流要宽阔一些(图 5), 显然这是液态物质流动过程中产生的侵蚀作用的一个基本特点. 另外, 在影像上还可以分辨出一些非常浅的轨迹, 它们是一些球状物质碾压沙丘所留下的痕迹. 这些沟谷的一个共同特点就是内壁都非常光滑, 在拐弯处沟谷变得相对宽大, 这一点和地球上的河流在弯道处由于水流的侵蚀作用而使河流变得宽大的特点非常相似.

### 3.3 II 型冲沟的沟尾

II 型冲沟和 I 型冲沟的沟尾差别很大, 因为 I 型冲沟在沟尾通常形成冲积扇, 甚至带来相当多的扇形堆积物; 而 II 型冲沟没有留下明显的沉积物. II 型冲沟有两类结束方式, 一种是在冲沟流动过程中突然停止, 仅在冲沟的末端形成一个比沟谷稍宽一点的环形隆起, 并且在隆起的中央有一个小黑点(图 6a), 而更多沟谷的末端出现一条或数条由球状沙球移动时留下的痕迹, 在其末端也出现类似的小的黑点(图 6b、6c), 有的 II 型冲沟在结束前一段产生许多分支, 这些分支较细, 但都有一个球形的尾端, 就

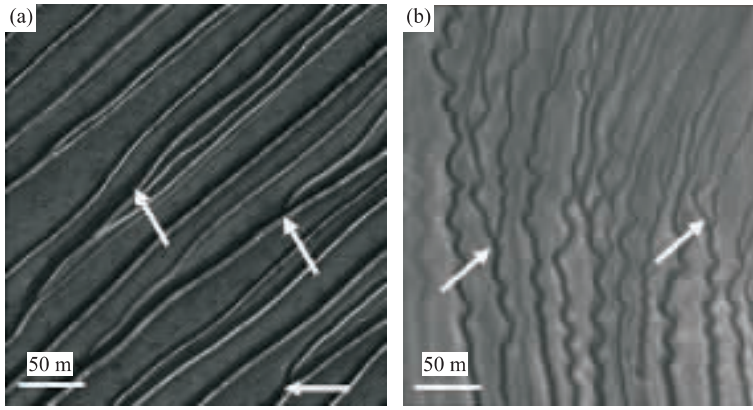


图 5 II 型冲沟的沟谷特征

Fig. 5 The characteristics of type II gully

具有明显沟头的沟谷(a)比没有沟头的沟谷(b)要直很多;两条沟谷交汇后比两条支流都要宽阔(a、b中箭头所示)。以上两幅图像均据 HiRISE 影像数据,向上为正北方向;a、b 影像编号分别为 PSP\_001440\_1255.jp2、PSP\_004196\_1325.jp2

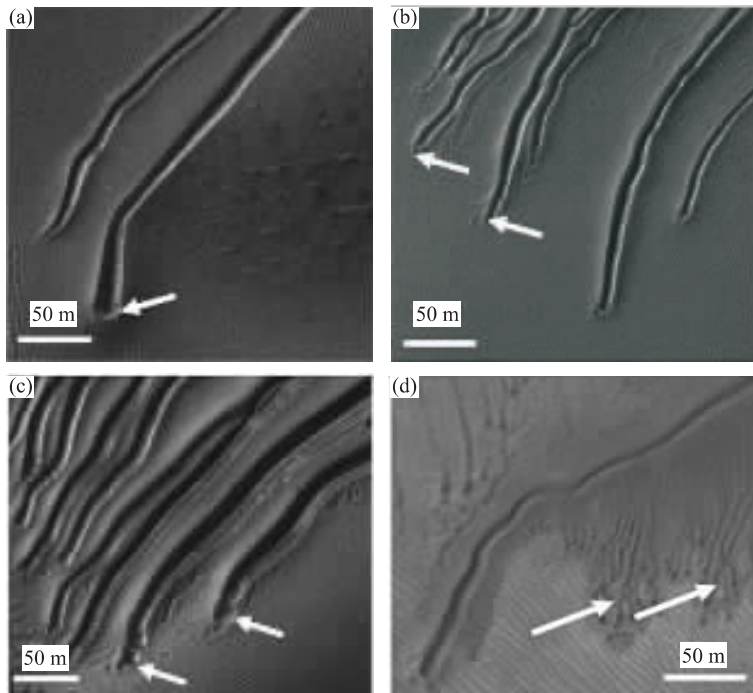


图 6 II 型冲沟的沟尾(箭头所示)

Fig. 6 The aprons of type II gully

a. 具有环形隆起的沟尾,并在其内部出现小黑点;b、c. 末梢具有沙球移动时留下痕迹的沟尾;d 具有大量分支的沟尾。以上 4 幅图像均来自于 HiRISE 影像数据,向上为正北方向;a、b、c 影像编号为 PSP\_001440\_1225.jp2;d 影像编号为 PSP\_004196\_1325.jp2

像足爪的痕迹,而且在每个分支的尾端都带有一个类似的隆起与中央的黑点(图 6d)。

## 4 II 型冲沟的成因

### 4.1 影像观测与理论探讨

经过以上对 II 型冲沟形态特征的分析,可以推

测它是由某种液体在流动过程中形成的,且这种液体具有如下特点:(1)产生于沙丘内部,并且储存量上存在区域性差异;(2)粘度较高且流速慢,才能形成蜿蜒曲折的冲沟;(3)挥发性强,在流动过程中不断蒸发,液体含量迅速减少,所以才能形成冲沟突然消失的现象;并且在消失前形成许多小的沙球,在沙丘上滚动留下痕迹之后消失;(4)可能有部分液体渗

透到沙丘内部,形成了冲沟终端的黑色小点.

根据火星表面的温压条件可以推测,形成 II 型冲沟的液态物质是液态水而非液态  $\text{CO}_2$  或者其他液态物质;这些液态水来源于沙丘中的间隙冰,而这些冰是在沙丘形成时由沙粒夹带形成的 (Grotzinger *et al.*, 2005),它们可以为冲沟的形成提供充足的水源.当火星表面的温压条件达到或接近水的三相点时,液态水就在沙丘中形成.有研究认为,在 20 000 年前,火星公转轨道夹角利于液态水的存在,从而形成丰富的季节性液态水 (Hecht and Bridges, 2003).为了证实这一点,笔者将 Russel 撞击坑不同季节的影像进行了比较 (图 7).在初冬季节 (图 7a, 其中  $L_s$  表示火星的日心轨道黄经,  $0^\circ \sim 90^\circ$  表示北半球春季,  $90^\circ \sim 180^\circ$  表示北半球夏季,  $180^\circ \sim 270^\circ$  表示北半球秋季,  $270^\circ \sim 360^\circ$  表示北半球冬季, 南半球与此正好相反), 该地区的沙丘中没有  $\text{CO}_2$  冰和水冰, 沙丘的反射率也比较低; 在中冬季节 (图 7b), 沙丘中出现了一层  $\text{CO}_2$  霜, 在沙丘的迎风面尤为明显, 而在沙丘底部则少的多; 在冬至季节 (图 7c),  $\text{CO}_2$  霜进一步增厚, 形成一层固态冰; 在春季 (图 7d 和 7e), 该地区的  $\text{CO}_2$  冰迅速升华, 同时固态冰也开始融化, 在沙丘表面形成许多暗色条带, 同时在局部地区还可以发现一些冰, 根据此时的季节特征, 它们应当是水冰而非  $\text{CO}_2$  冰, 可见沙丘中确实存在大量的水源; 在这个过程中, 固态  $\text{CO}_2$  冰始终覆盖在水冰之上,  $\text{CO}_2$  冰的迅速升华不仅将固态冰直接暴露在太阳光之下, 而且由于大量  $\text{CO}_2$  冰的升华, 也使火星表面大气压力增大, 这无疑为火星局部地区液

态水的存在提供了良好的条件.在水相变过程中,当液态水产出率高于气化速度时,少量液态水在沙丘表面开始流动,流动速率根据水量的不同而有差异,但总体来说流动很慢,便开始形成 II 型冲沟;在这个过程中,II 型冲沟中的水也迅速蒸发而使水量减少,当液态水量减小,以致不能带动沙粒时,流动便停止并将沟渠顶起,同时可能形成一些含水量很小的沙球,并由于惯性而向前运动一小段距离,这就是我们所看到的沟渠终端通常有一些足爪似的痕迹;另外,少量的液态水渗透到沙丘中而在末端出现黑点.

#### 4.2 II 型冲沟成因的模拟试验

为了进一步研究 II 型冲沟的成因, Coleman *et al.* (2008) 利用水和泥浆在沙丘上进行了模拟试验,其实验结果与火星表面沙丘中的冲沟有以下异同点: (1) 模拟结果总体和冲沟有类似的组成, 即都有 3 个组成部分; (2) 模拟结果的沟渠两侧有飞溅出的沙粒, 而火星沙丘上的冲沟中只有一条沟谷; (3) 模拟结果末端中有明显的堆积物质, 而火星冲沟的沟尾没有明显的堆积物. 对这些现象的解释可以归结为两点: (1) 火星表面液态水含量相对匮乏; (2) 火星表面大气压力和温度非常低, 水分蒸发非常快.

### 5 I 型冲沟成因的讨论

在得出 II 型冲沟是由火星表面下的间隙冰融化而成的液态水携带少量泥沙形成的结论之后, 我们试着用这种解释对 I 型冲沟的成因进行探讨. 在研究中发现, 撞击坑壁也存在着一些冲沟和 II 型冲沟

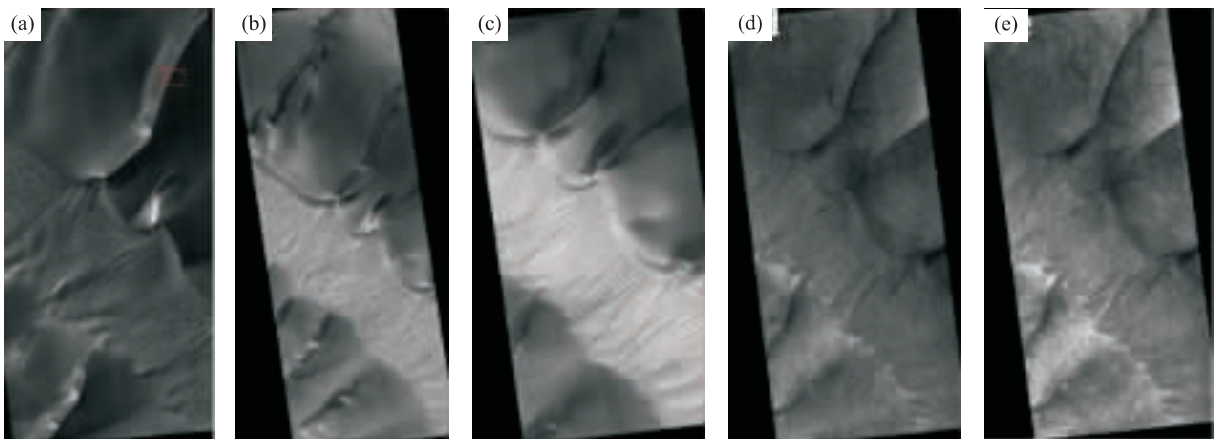


图 7 沙丘在不同季节的变化

Fig. 7 The transformations of sand dunes in different seasons

影像 a~e 均来自于同一个地区的 HiRISE 影像, 影像编号分别为 (a) PSP\_001440\_1225,  $L_s = 136$ , 2006; (b) PSP\_001981\_1225,  $L_s = 158$ , 2006; (c) PSP\_002337\_1255,  $L_s = 173$ , 2007; (d) PSP\_004038\_1255,  $L_s = 253$ , 2007; (e) PSP\_004249\_1255,  $L_s = 263$ , 2007;  $L_s$  表示各幅影像获取时火星的日心轨道黄经, 向上为正北方向



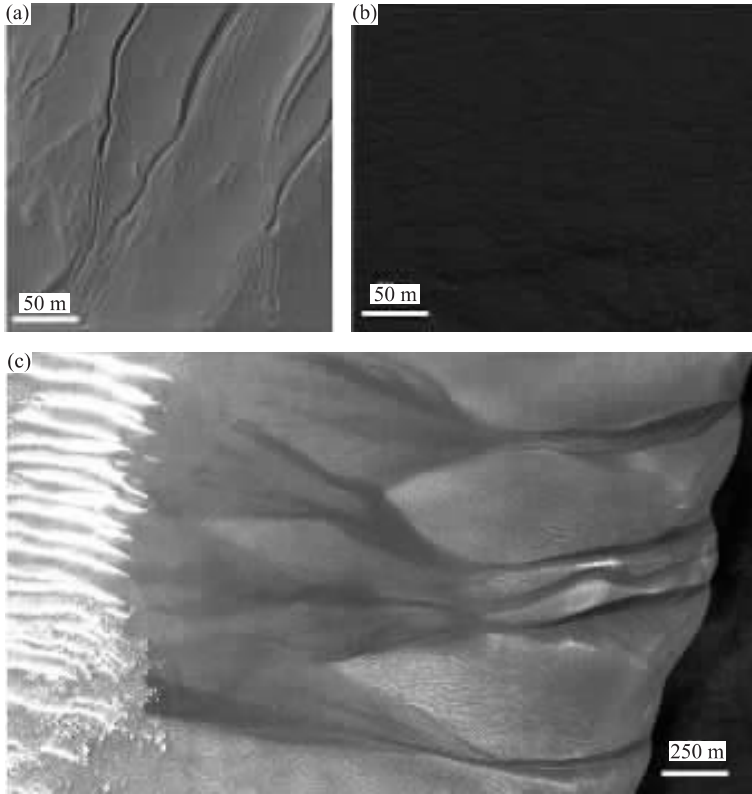


图 8 出现在撞击坑壁上的 II 型冲沟与出现在沙丘中的 I 型冲沟

Fig. 8 Types II gully on crater's rim and type I gully on sand dunes

a. 在撞击坑壁上也发育了与 II 型冲沟非常相似的冲沟; b. 在这些冲沟的沟头部位发现的多边形冻土; c. 在沙丘中发育的 I 型冲沟. 以上图像均来自于 HiRISE 影像, 向上为正北方向, a, b, c 影像编号分别为 PSP\_001697\_1390.jp2, PSP\_001330\_1395.jp2, PSP\_004196\_1325.jp2

形态非常相似(图 8a), 这些冲沟多发育在撞击坑壁中, 它们的形态较直, 在沟尾也有足爪状的痕迹. 另外, 如果 I 型冲沟的沟头位于阴影之内, 那么这些地方通常有一些多边形土(图 8b), 它们很可能意味着这些地方的下面存在固态水冰, 它们从而构成了形成冲沟的水源. I 型冲沟在低纬度地区分布很少, 这可能由于该地区的太阳辐射较强, 而且大气相对干燥, 因而水汽蒸发快, 导致液态水不能在火星表面稳定存在. I 型冲沟多分布在面向极地的一侧, 这一点也和太阳照射有关, 因为向赤道坡面上的照射强度大, 水冰直接气化而不利于形成液态水(Arfstrom, 2002). 另外, 在沙丘上也发现一些冲沟的特征和 I 型冲沟非常类似(图 8c).

## 6 结论

在火星表面发现了两种类型的冲沟, I 型冲沟主要分布在撞击坑壁或山谷壁上, II 型冲沟主要分布在沙丘中; II 型冲沟的一些特征只能用液态水解

释, 而且沙丘在形成过程中含有丰富的间隙冰, 可成为形成冲沟的水源; II 型冲沟也发育在撞击坑壁上, 因而 I 型冲沟的形成也是和液态水密不可分的, 撞击坑壁上的多边形土便是固态水冰存在的直接证据. 同时最近发射的凤凰号着陆器已经找到火星表面下的固态水冰, 因而 I 型冲沟分布的地区也具有形成水源的条件. 总之, 两种类型的冲沟都和液态水的作用密切相关.

虽然火星表面现在的温压条件对液态水的形成十分不利, 但也并非完全没有可能存在液态水. 在夏季, 火星表面部分地区的温度可以达到  $0^{\circ}\text{C}$  以上, 并且由于火星表面大量固态  $\text{CO}_2$  冰的升华使得火星大气压力升高, 可能为液态水的存在提供条件. 这些推论都需要进一步的实验室模拟研究, 并且需要具有与火星表面类似的温度、压力和水量条件.

致谢: 非常感谢曾佐勋教授在与作者讨论中所给予的启发, 尤其感谢中国科学院国家天文台和美国得州大学圣安东尼奥分校遥感与地学信息实验室给予的资助, 同时感谢 Stuart Foote 先生在使用 ENVI\_HiRISE\_Toolkit 软件中的指导.

## References

- Arfstrom, J. D., 2002. A model of recent Martian gully and alcove formation by seepage of water. *Lunar Planet. Sci.*, XXXIII, abstract No. 1174.
- Balme, M., Mangold, N., Baratoux, D., et al., 2006. Orientation and distribution of recent gullies in the southern hemisphere of Mars: observations from high resolution stereo camera/Mars express (HRSC/MEX) and Mars Orbiter Camera/ Mars Global Surveyor (MOC/MGS) data. *J. Geophys. Res.*, 111(E5): E05001, doi: 10.1029/2005JE002607
- Bart, G. D., 2007. Comparison of small lunar landslides and Martian gullies. *Icarus*, 187(2): 417—421. doi: 10.1016/j.icarus.2006.11.004
- Burt, D. M., Knauth, L. P., Klonowski, S., 2002. Dense eutectic brines on Mars: they could be both common and Ca-rich. *Lunar Planet. Sci.*, XXIII, abstract No. 1240.
- Christensen, P. R., 2003. Formation of recent Martian gullies through melting of extensive water-rich snow deposits. *Nature*, 422(6927): 45—48. doi: 10.1038/nature01436
- Coleman, K. A., Dixon, J. C., Howe, K. L., et al., 2008. Simulation of Martian gullies using water/ice slush. *Lunar Planet. Sci.*, XXXIX, abstract No. 2240.
- Costard, F., Forget, F., Mangold, N., et al., 2002. Formation of recent Martian debris flows by melting of near-surface ground ice at high obliquity. *Science*, 295(5552): 110—113. doi: 10.1126/science.1066698
- Costard, F., Mangold, N., Baratoux, D., et al., 2007. Current gullies activity: dry avalanches at seasonal defrosting as seen on HiRISE images. Seventh International Conference on Mars, abstract No. 3133.
- Edgett, K. S., Malin, M. C., Williams, R. M. E., et al., 2003. Polar- and middle-latitude Martian gullies: a view from MGS MOC after 2 Mars years in the mapping orbit. *Lunar Planet. Sci.*, XXXIV, abstract No. 1038.
- Gaidos, E. J., 2001. Cryovolcanism and the recent flow of liquid water on Mars. *Icarus*, 153(1): 218—223. doi: 10.1006/icar.2001.6649
- Grotzinger, J. P., Arvidson, R. E., Bell III, J. F., et al., 2005. Stratigraphy and sedimentology of a dry to wet eolian depositional system, Burns Formation, Meridiani Planum, Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 240(1): 11—72. doi: 10.1016/j.epsl.2005.09.039
- Hartmann, W. K., 2003. Upper latitude ice flow, gullies, and long-term glacial history. Third Mars Polar Science Conference, abstract No. 8110.
- Hecht, M. H., Bridges, N. T., 2003. A mechanism for recent production of liquid water on Mars. *Lunar Planet. Sci.*, XXXIV, abstract No. 2073.
- Heldmann, J. L., Carlsson, E., Johansson, H., et al., 2007. Observations of Martian gullies and constraints on potential formation mechanisms II. The northern hemisphere. *Icarus*, 188(2): 324—344. doi: 10.1016/j.icarus.2006.12.010
- Heldmann, J. L., Mellon, M. T., 2004. Observations of Martian gullies and constraints on potential formation mechanisms. *Icarus*, 168(2): 285—304. doi: 10.1016/j.icarus.2003.11.024
- Kirk, R. L., Archinal, B. A., Lee, E. M., et al., 2001. Global digital image mosaics of Mars: assessment of geodetic accuracy. *Lunar Planet. Sci.*, XXXII, abstract No. 1856.
- Kirk, R. L., Howington-Kraus, E., Rosiek, M. R., et al., 2007. Ultrahigh resolution topographic mapping of Mars with HiRISE stereo images: methods and first results. *Lunar Planet. Sci.*, XXXVIII, abstract No. 1428.
- Malin, M. C., Danielson, G. E., Ingersoll, A. P., et al., 1992. Mars observer camera. *J. Geophys. Res.*, 97(E5): 7699—7718. doi: 10.1029/92JE00340
- Malin, M. C., Danielson, G. E., Ravine, M. A., et al., 1991. Design and development of the Mars observer camera. *Int. J. Imag. Syst. Technol.*, 3(2): 76—91. doi: 10.1002/ima.1850030205
- Malin, M. C., Edgett, K. S., 2000. Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, 288(5475): 2330—2335. doi: 10.1126/science.288.5475.2330
- Mangold, N., Baratoux, D., Costard, F., et al., 2008. Current gullies activity: dry avalanches observed over seasonal frost as seen on HiRISE images. Workshop on Martian Gullies: theories and Tests, abstract No. 8005.
- Mangold, N., Costard, F., Forget, F., 2003. Debris flows over sand dunes on Mars: evidence for liquid water. *J. Geophys. Res.*, 108(E4): 5027. doi: 10.1029/2002JE001958
- Márquez, A., Pablo, M. Á., Oyarzun, R., et al., 2005. Evidence of gully formation by regional groundwater flow in the Gorgonum-Newton region (Mars). *Icarus*, 179(2): 398—414. doi: 10.1016/j.icarus.2005.07.020
- Mellon, M. T., Phillips, R. J., 2001. Recent gullies on Mars and the source of liquid water. *J. Geophys. Res.*, 106(E10): 23165—23179. doi: 10.1029/2000JE001424
- Miyamoto, H., Dohm, J. M., Baker, V. R., et al., 2004. Dynamics of unusual debris flows on Martian sand dunes. *Geophys. Res. Lett.*, 31(13): L13701. 1—L13701. 4. doi: 10.1029/2004GL020313

Musselwhite, D. S. , Swindle, T. D. , Lunine, J. I. , 2001. Liquid CO<sub>2</sub> breakout and the formation of recent small gullies on Mars. *Geophys. Res. Lett.* , 28 (7) : 1283 — 1285. doi: 10. 1029/2000GL012496

Reiss, D. , van Gasselt, S. , Neukum, G. , et al. , 2004. Absolute dune ages and implications for the time of formation of gullies in Nirgal Vallis, Mars. *J. Geophys. Res.* , 109 ( E6 ) : E6007. 1 — E6007. 9. doi: 10. 1029/

2004JE002251

Treiman, A. H. , 2008. Wind and the origin of Martian gullies; a local and regional test in Cimmeria. Workshop on Martian Gullies: Theories and Tests, abstract No. 8020.

Yue, Z. , Xie, H. , 2007. Wind a potential mechanism of Mars gully formation. American Geophysical Union, Fall Meeting, abstract No. P31B—0436.

\*\*\*\*\*

## 《地球科学——中国地质大学学报》

### 2010 年 第 35 卷 第 3 期 要目预告

新一代数字城市集成开发平台 .....	吴信才
无缝空间数据中心概念模型及其技术体系 .....	周顺平等
跨 GIS 平台应用集成开发环境技术 .....	徐世武等
功能可配制的 GIS 服务引擎 .....	吕建军等
数据中心—GIS 功能仓库的关键技术 .....	万 波等
分布式空间分析运算关键技术 .....	吴 亮等
基于规则库的三维空间数据模型 .....	郑 坤等
数据目录体系关键技术 .....	刘福江等
基于成分关联区域相似度的面实体模糊匹配算法 .....	叶亚琴等
基于 MapGIS 数据中心构建基础地理信息地图集模型 .....	左泽均等
多模式复合交通网络的拓扑一致性处理方法 .....	杨 林等