

# 火星Evros Vallis与塔里木盆地开都河流域河网形态和水文特征比较

苟盛<sup>1,2</sup>, 岳宗玉<sup>1</sup>, 邸凯昌<sup>1</sup>, 徐懿<sup>2</sup>

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 澳门科技大学月球与行星科学实验室 中国科学院月球与深空探测重点实验室伙伴实验室, 澳门 519020

**摘要:** 从比较行星学的角度, 开展火星典型河网和地球类比区河网对比研究, 对深入理解火星表面河网产生、发展和消亡的时空演变过程, 甚至对探索火星古老生命遗迹均具有重要意义。分别基于MOLA和ASTER GDEM高程数据, 提取了火星Evros Vallis和新疆塔里木盆地开都河流域的河网水系, 定量计算并比较了各级河流平均长度、各级河流平均弯曲系数、河网密度、河道密度、河道比降、河网分维数等河网形态与水文特征参数。结果显示: (1)Evros Vallis流域各级河流平均长度是开都河流域长度的1.4—2.5倍, 说明Evros Vallis流域河流的规模普遍较大; (2)Evros Vallis流域各级河流平均弯曲系数为1.19, 为平直河流; 开都河流域各级河流平均弯曲系数均值为1.35, 为弯曲河流; (3)Evros Vallis和开都河流域的河网分维数分别是1.63和1.70, 表明这两个流域的地貌发育均处于幼年期刚刚结束, 壮年期才开始的阶段, 但前者的河网密度和河道密度均远小于后者, 说明其整体发育程度小于后者; (4)Evros Vallis干流纵剖面整体呈现下凹趋势, 河道相对平缓, 比降为1.63%; 整个开都河干流的河道比降为3.74%, 其纵剖面整体形态可划分为两部分, 河源这一段为下凹型, 河道较平缓, 比降为2.54%, 河口这一段为上凸型, 河道较陡峭, 比降为5.18%。Evros Vallis的流域形态与水文参数与地球上自然形成的流域的形态与水文特征参数非常相似, 并且其干流河道内还能观察到心滩等典型河流地貌、河流干涸过程中形成的泥裂以及表明水/冰曾存在的壁垒撞击坑, 这些特征强烈显示该流域是长期水流冲刷侵蚀形成。

**关键词:** 火星表面, Evros Vallis, 开都河, 形态特征, 水文特征, 定量比较

**中图分类号:** TP79 **文献标志码:** A

**引用格式:** 苟盛, 岳宗玉, 邸凯昌, 徐懿. 2018. 火星Evros Vallis与塔里木盆地开都河流域河网形态和水文特征比较. 遥感学报, 22(2): 313–323

**Gou S, Yue Z Y, Di K C and Xu Y. 2018. Quantitative comparison of morphometric and hydrological characteristics of valley networks between Evros Vallis on Mars and Kaidu River in Tarim Basin as terrestrial analog. Journal of Remote Sensing, 22(2): 313–323 [DOI:10.11834/jrs.20187014]**

## 1 引言

火星是太阳系内与地球最为相似的行星, 已成为各国开展深空探测任务的主要目标之一。目前火星表面干旱寒冷, 主要存在撞击坑和大型撞击盆地、盾形火山、风成沙丘、极区极冠、峡谷系统、干涸河床和沟渠等多种地貌。广泛发育的河网、干涸河床、三角洲、冲积扇和沟渠等反映了曾经存在的流水活动不断侵蚀和改造火星表面

而形成的流水地貌(Baker, 2006; McSween, 2006)。科学家最早于1972年利用“水手9号”返回的影像发现火星上存在河网(McCauley 等, 1972)。河网的发现引发了人们对火星过去是否存在支持生命生存的环境的讨论, 并成为火星科学研究的热点之一。随着“火星全球勘探者MGS(Mars Global Surveyor)”、“火星奥德赛MO(Mars Odyssey)”、“火星快车MEX(Mars Express)”和“火星侦察轨道器MRO(Mars Reconnaissance Orbiter)”等探测任务相

收稿日期: 2017-02-22; 预印本: 2017-08-01

基金项目: 国家自然科学基金(编号: 41702354); 澳门科技大学月球与行星科学实验室—中国科学院月球与深空探测重点实验室伙伴实验室开放课题(编号: 039/2013/A2); 遥感科学国家重点实验室自由探索/青年人才项目(编号: 16RC-07)

第一作者简介: 苟盛(1985—), 男, 助理研究员, 研究方向为遥感地质与深空探测。E-mail: gousheng@radi.ac.cn

通信作者简介: 邸凯昌(1967—), 男, 研究员, 研究方向为行星遥感制图与导航定位。E-mail: dikc@radi.ac.cn

继成功实施, 科研人员利用它们获取的大量高分辨率遥感影像进一步研究了火星表面河网的分布, 发现它们大多数位于火星赤道附近和中南纬度区域(Hynek 等, 2010)。火星表面的河网与地球上的河网极为相似, 前人对它们从形态特征、空间分布、形成年代等开展了多个方面的研究, 对它们的可能出现和消失成因也提出了不尽相同的假说, 如降雨流水冲刷、冰川和泥石流冲刷、地下水外泄、地下含冰层融化后外泄等(Carr和Clow, 1981; Carr, 1995; Gulick, 2001; Irwin和Howard, 2002; Carr和Head, 2003; Howard等, 2005; Hoke和Hynek, 2009)。地球上, 水流侵蚀地表形成河网水系, 在补给量不足的情况下, 往往形成季节性河流甚至最终干涸, 而在补给量充足时, 河流最终注入汇水盆地形成湖泊或者注入海洋参与全球水循环。Luo和Stepinski (2009)在解释火星表面河网主要分布于南半球时, 根据火星表面北半球以低地、南半球以高地为主的地貌特征, 推测火星北半球表面曾经存在着一个较大的海洋。

火星表面存在不同形态特征的水系, 且规模大小不等, 其成因也有所差异。位于火星诺亚高地的Evros Vallis(12°S, 12°E)是火星上年代最老的河道之一, 水系较为发育, 整体形态呈树枝状。河网水系的发育说明了火星表面过去的气候条件比干旱寒冷的现状要温暖潮湿得多, 局部地区甚至还存在流水活动。同时, 高光谱遥感探测显示该区域存在含水矿物(Carter 等, 2013)。含水矿物通常是水参与条件下热液蚀变和变质的产物(如火山灰), 能够指示矿物形成时的温压条件和揭示古气候环境演变过程(汤艳杰 等, 2002)。以上这些说明Evros Vallis地区探测到的含水矿物可能是沉积物在开放水域蚀变形成。新疆塔里木盆地处于中国3大地貌阶地的第2与第3阶地过渡带位置, 整体地势南高北低, 自西向东缓倾。由于盆地被青藏高原、帕米尔高原、天山、昆仑山、阿尔金山等高大山系包围, 使得海洋季风输送的水汽无法达到, 年蒸发量远远大于降雨量(金炯 等, 1994; Chen 等, 2006), 导致该地区气候极端干旱, 发育了大量独特的地貌, 如雅丹、沙丘、洪积/冲积平原、干河道和干盐湖等(白振平, 1994; 王弭力 等, 2006; 董治宝 等, 2011; 董瑞杰 等, 2013), 这些流水和风沙地貌与火星上观察到的典型地貌

十分相似, 是中国除柴达木盆地外(Xiao 等, 2017), 另外一个潜在的可开展火星环境演化和气候变迁等类比研究的理想场所。塔里木盆地的开都河是当地重要的地表水源, 历史上, 开都河流域曾与塔里木河下游汇合同注入罗布泊, 后来塔里木河河道不断南移, 二者逐渐脱离形成古三角洲, 但其上仍能分辨出树枝状水系(白振平, 1994; 张永雷 等, 2016)。目前, 罗布泊已经完全干涸消失, 只留下一个多级环状“大耳朵”形状的盐碱地痕。地质工作者在此勘察到中国重要的钾盐矿产区, 主要有氯化钾等资源(王弭力 等, 2006)。Evros Vallis与塔里木河的水系形态较为相似, 流域内的含水矿物和罗布泊的钾盐等矿物的形成都离不开水。随着中国火星探测任务的提出, 从比较行星学的角度, 开展火星表面和地球类比区对比研究, 探测和分析地球类比区流域河网水系特征和矿物成分等对深入理解火星表面河网水系产生、发展和消亡的时空演变过程, 甚至对探索火星古老生命遗迹均具有重要意义。为此, 本文选择火星诺亚高地的Evros Vallis和新疆塔里木盆地的开都河流域, 开展流域河网水系提取与特征对比研究。

## 2 类比研究区概况

### 2.1 火星Evros Vallis

Evros Vallis位于火星地形南北分界处附近, 介于子午平原(Meridiani Planum)东南和诺亚高地(Noachis Terra)之间, 高程起伏范围约-2000—3900 m, 整个峡谷呈东西走向, 全长约800 km(图1)。Evros Vallis流域范围内大部分坡度均小于2°, 坡向以西南、西北和西向为主。该区域内几乎所有的撞击坑均形成于诺亚纪时期, 并受到强烈的后期地质改造作用, 有些撞击坑坑壁、坑缘以及溅射席上能够观测到水流侵蚀后形成的明显的平形状河谷和冲沟。

### 2.2 新疆塔里木盆地开都河流域

开都河流域地处内陆荒漠, 位于新疆塔里木盆地东北侧, 地势西高东低、北高南低, 平均海拔3100 m(图2), 流域内大部分地区坡度小于15°, 坡向以东北、西南、东向和南向为主。开都河源于天山中部, 河流呈“U”字型依次流经上游的小尤

尔都斯盆地、中游的大尤尔都斯盆地和下游的焉耆盆地后注入博斯腾湖。由于开都河下游地区深受农垦开发等工农业活动影响，河流的自然形态受到较大影响，本文仅以传统的流域中上游地区为研究对象开展比较研究，即图2的上游至大山口水文站这一段。

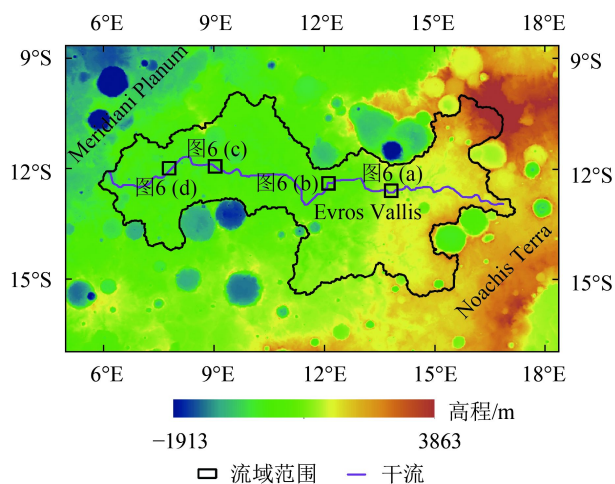


图1 Evros Vallis地区MOLA高程及流域范围

Fig. 1 MOLA elevation map of Evros Vallis and its drainage basin

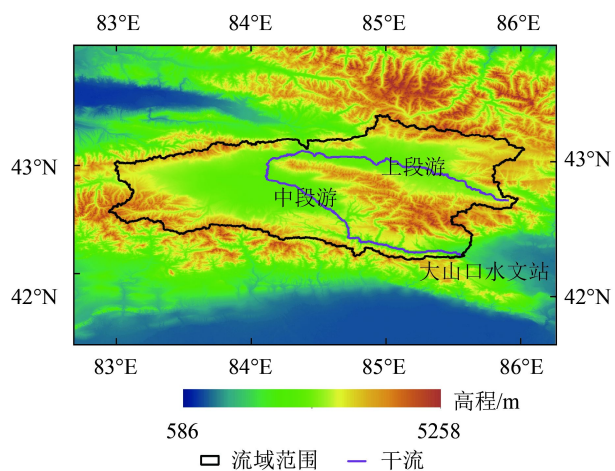


图2 开都河流域范围及ASTER GDEM高程

Fig. 2 ASTER GDEM elevation map of Kaidu river and its drainage basin

### 3 数据源

#### 3.1 Evros Vallis流域数据

采用搭载于“火星全球勘探者”MGS的激光高度计MOLA(Mars Orbiter Laser Altimeter)获取的高程数据提取Evros Vallis的河网。该数据的空间分辨率约为463 m，水平和垂直精度分别为100 m和

10 m(Neumann等, 2001)。此外，本文研究中用到的影像数据包括搭载于“火星奥德赛MO”的热发射成像系统THEMIS(Thermal Emission Imaging System)最新发布的全球镶嵌影像，分辨率约为100 m(Edwards等, 2011)，以及搭载于“火星侦察轨道器MRO”的背景相机(Context Camera)和高分辨率成像科学实验相机HiRISE(High Resolution Imaging Science Experiment)影像，分辨率分别约为5 m和0.25 m(Malin等, 2007; McEwen等, 2007)。

#### 3.2 开都河流域数据

采用2009年美国和日本共同推出的先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型ASTER GDEM(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Map)数据提取整个开都河流域的河网，该数据的空间分辨率为30 m，水平和垂直精度分别为30 m和20 m(Tachikawa等, 2011)。此外，本文研究中还用到中国高分一号影像，分辨率约为8 m(白照广, 2013)。

### 4 流域河网水系提取以及形态和水文特征分析方法

#### 4.1 流域河网水系提取方法

流域河网水系的准确提取是开展形态和水文特征定量分析与比较的基础，本文利用ArcGIS软件平台的Spatial Analysis模块和Arc Hydro Tools模块，对火星Evros Vallis和地球类比区开都河流域的高程数据进行地形分析与处理，提取流域河网水系。

火星Evros Vallis和地球类比区开都河流域河网水系较为发达，地势平坦，支流纵横交错。同时，高程数据也存在精度限制，单独利用它提取流域河网水系会产生较多的误提结果。因此，本文先基于高分辨率遥感影像人工识别和提取火星Evros Vallis和地球类比区流域内的干流和主要支流的矢量数据。然后按照图3所示流程提取河网水系：

(1) 利用DEM Reconditioning工具采用AGREE法(Hellweger, 1997)将干流和主要支流等实际河网信息融合嵌入到原始高程数据。经该方法调整后的高程数据与真实河流高程信息吻合度更高，且能有效减小平坦区域平行伪河道的生成。

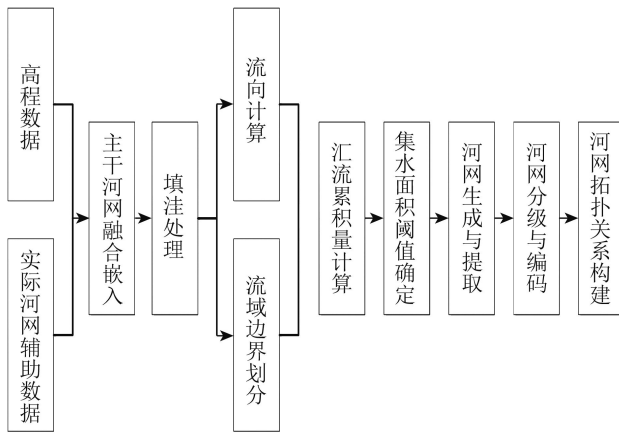


图3 火星Evros Vallis和地球类比区流域河网水系提取流程

Fig. 3 Flowchart of drainage network extraction of Evros Vallis on Mars and terrestrial analog

(2) 利用Fill Sinks工具进行填洼处理以尽可能消除高程数据中由于数据噪音等导致的非真实地形,生成无洼地高程数据,使得水流可以畅通无阻地流至区域地形边缘。

(3) 利用Flow Direction工具在已填注高程数据的基础上采用最大坡降法(O'Callaghan和Mark, 1984)计算水流方向。该方法极大地概括了自然状态下的水流方向,在 $3 \times 3$ 的格网上,中心格网点的水流方向是与之相邻的8个格网中坡度最陡的方向(分别表示东、东南、南、西南、西、西北、北、东北8个方向)。

(4) 利用Flow Accumulation工具在流向数据的基础上计算流过每个格网点的水量,从而得到各个格网点的汇流累积量。单个格网点的汇流累积量等于直接或间接流经该格网点的水流的累积量,其值越大,表示该格网点越容易形成地表径流。

(5) 利用Stream Definition工具根据设定的集水面积阈值分别生成火星Evros Vallis和塔里木盆地开都河流域河网水系。由于集水面积阈值直接关系到河网水系中各级河流长度及总河长的计算,继而影响河网和河道密度等形态和水文特征参数分析的准确度。本文以孔凡哲和李莉莉(2005)提出的河网密度法确定出火星Evros Vallis和开都河流域的最佳集水面积阈值分别是 $27 \text{ km}^2$ 和 $30 \text{ km}^2$ 。

(6) 由于在地势平坦地区,如平原和谷底等,最大坡降法计算的水流方向是随机的,可能生成平行状的伪沟谷,还需要利用Edit工具进一步手工

编辑剔除和修正这些伪沟谷。

(7) 利用Stream Order工具采用Strahler分级法(Strahler, 1958)对火星和地球类比区的河网水系进行分级,在此基础上构建流域河网水系的拓扑关系,用于进一步计算和分析火星和地球类比区的流域形态和水文特征。

## 4.2 流域形态和水文特征分析方法

在准确提取流域河网水系和构建拓扑关系的基础上,本文主要计算河流长度、河网密度、河道密度、河道比降、各级河流平均长度、各级河流平均弯曲系数、河流分叉比、河流长度比以及河流分维数等流域河网形态和水文参数,开展火星Evros Vallis和地球类比区开都河流域形态和水文特征对比分析研究。这些地球上常用的河网形态和水文特征计算方法已经应用于火星表面的河网水系研究(Carr和Chuang, 1997, Stepinski等, 2002, 2004, Irwin等, 2005, Som等, 2009),它们的计算公式可参考高抒和张捷(2006)编写的《现代地貌学》。对于河流分维数,常用的主要有网格法和河系定律法,实际计算显示二者基本吻合,均可用于研究河流形态的分维特征(冯平和冯焱, 1997)。本文采用La Barbera和Rosso(1989)在Horton河系和河数定律基础上推导的河网分维数计算公式,该公式能够利用已经计算出的河长比和分叉比,保持了信息的一致性和可比较性。

$$D = \max [1, \lg R_B / \lg R_L] \quad (1)$$

式中,  $R_B$ 是河流分叉比,  $R_L$ 是河流长度比。

## 5 结果与讨论

### 5.1 流域河网水系提取结果

图4为火星Evros Vallis和地球类比区新疆塔里木盆地开都河流域河网水系提取结果。从形态上看,二者均具有类似树枝状的水系,说明二者地表抗侵蚀能力较弱。Evros Vallis干流河道长度约是开都河干流河道长度的两倍,分别为 $802.28 \text{ km}$ 和 $397.60 \text{ km}$ 。为了验证本文利用高程数据提取的河网水系精度,将本文提取的河网分别与Hynek等人(2010)主要利用分辨率为 $230 \text{ m}$ 的THEMIS全球镶嵌影像在Evros Vallis流域人工识别的河网以及韩鑫(2014)在开都河同样区域内提取的河网相比较,

发现二者主要形态特征一致，但细节信息有所差异。这可能分别是由于MOLA高程数据分辨率较低(约463 m)引起的以及本文计算的最佳集水面积阈值与韩鑫(2014)一文中使用的阈值不一致引起的。考虑到本文将两个流域的干流和主要支流的实际河网融合嵌入到初始高程数据，增加了高程数据的有效信息量，故虽然存在一定相对误差，但总体上该方法的提取结果是可靠的。因此，本文利用高程数据提取的火星Evros Vallis和地球类比区开都河流域的河网水系可用于后续形态和水文特征参数定量计算并开展对比分析研究。

区塔里木盆地开都河流域二者河网水系形态参数统计结果。由表1、表2可知，火星和地球类比区河流数目随河流等级的升高呈减少趋势。其中，1级和2级河流较多，覆盖整个流域范围，分别占火星和地球类比区所有河流数目的93.25%和94.86%，它们的长度分别占整个流域内河流总长度的83.95%和87.64%。

表1 Evros Vallis流域河网水系形态参数

Table 1 Morphometric parameters of valley network of Evros Vallis drainage basin

河流等级	数目/条	总长/度/km	平均长度/km	平均弯曲系数	分叉比	河长比
1级	121	2856.34	23.61	1.17	3.90	—
2级	31	978.19	31.55	1.16	4.43	1.34
3级	7	396.12	56.59	1.15	2.33	1.79
4级	3	406.44	135.48	1.21	3.00	2.39
5级	1	402.68	402.68	1.25	—	2.97

表2 开都河流域河网水系形态参数

Table 2 Morphometric parameters of valley network of Kaidu river drainage basin

河流等级	数目/条	总长/度/km	平均长度/km	平均弯曲系数	分叉比	河长比
1级	196	1935.08	9.87	1.24	4.45	—
2级	44	976.57	22.19	1.26	4.89	2.25
3级	9	227.15	25.24	1.35	3.00	1.14
4级	3	281.05	93.68	1.40	3.00	3.71
5级	1	161.61	161.61	1.49	—	1.73

表1和表2对比表明，Evros Vallis流域各级河流平均长度都比开都河流域长，是后者的1.4—2.5倍，说明Evros Vallis流域河流的规模普遍较大。开都河流域各级河流平均弯曲系数都比Evros Vallis流域大，它们的均值为1.35，说明其为弯曲河流，而Evros Vallis流域各级河流平均弯曲系数为1.19，为平直河流，这与Irwin等人(2008)根据Hack指数推断火星南部高地的流域较地球上同等规模的流域更为狭长的结论一致。图4的河网形态也显示Evros Vallis流域的河道较为平直。Horton(1945)通过分析大量河流的形态参数后发现，在自然水系中，河流分叉比的值介于3.0—5.0，河长比的值介于1.5—3.5。Evros Vallis流域的平均河流分叉比和河长比分别为3.42和2.12，开都河流域的平均值分别为3.84和2.21，它们全部都处于地球上自

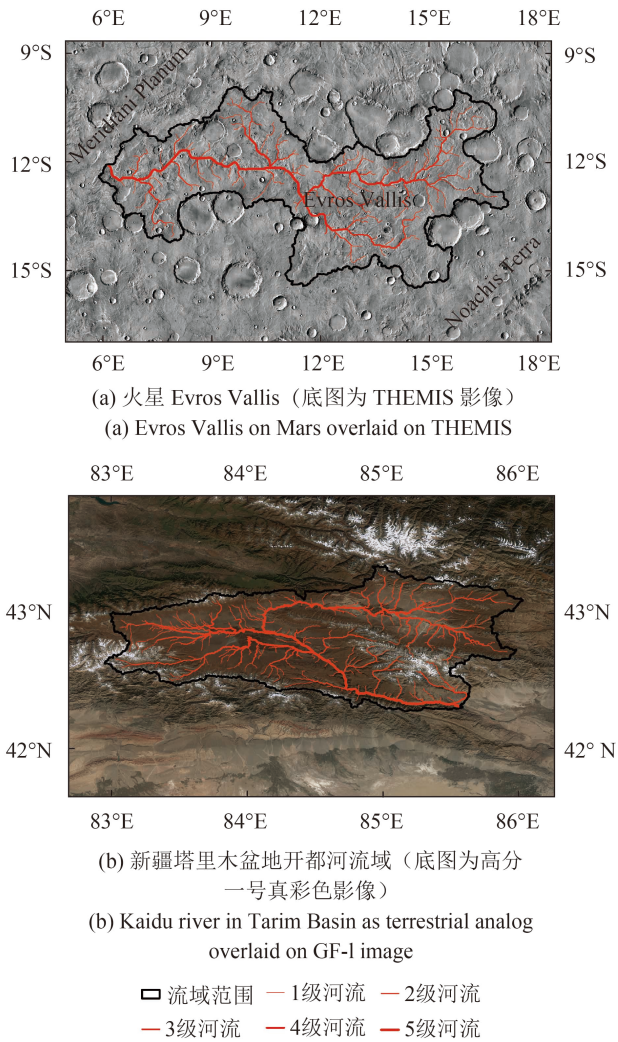


图4 火星和地球类比区流域河网水系提取结果  
Fig. 4 Valley network extraction results

## 5.2 形态参数和水文特征定量比较结果

### 5.2.1 河网分级结果比较

表1和表2是火星Evros Vallis流域和地球类比

然水系的经验值范围内。

### 5.2.2 河网和河道密度比较

何隆华和赵宏(1996)研究指出,整体水系的河网分维数反映了水系所处流域的地貌侵蚀发育阶段,其值为1.0—1.6时,流域地貌处于侵蚀发育阶段的幼年期;为1.6—1.89时,处于壮年期;为1.89—2.0时处于老年期。本文计算出Evros Vallis流域和开都河流域的河网分维数分别为1.63和1.70(表3),说明这两个流域的地貌发育处于幼年期

表3 火星Evros Vallis和地球类比区开都河流域河网水系水文特征参数

Table 3 Hydrological parameters of valley networks of Evros Vallis drainage basin on Mars and Kaidu river drainage basin as terrestrial analog

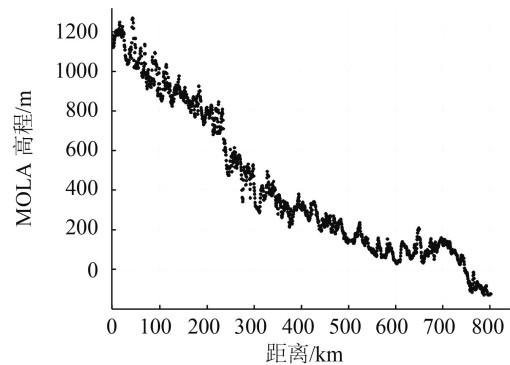
流域名称	河网总长度/km	河道总数/条	流域面积/km <sup>2</sup>	河网密度/(km/km <sup>2</sup> )	河道密度/(条/km <sup>2</sup> )	河网分维数
Evros Vallis流域	5039.78	163	105905.72	0.048	0.002	1.63
开都河流域	3581.46	253	18348.47	0.195	0.014	1.70

### 5.2.3 河流纵剖面形态与比较

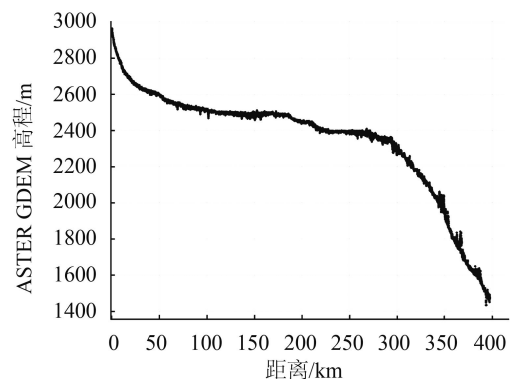
本文以高程数据空间分辨率为间隔,分别对火星Evros Vallis和开都河流域的干流提取河长和对应的河床高程值,绘制干流的河道纵剖面曲线(图5)。由于MOLA高程数据空间分辨率的限制以及流域范围内广泛存在的撞击坑和河道后期改造填埋的综合影响,图5(a)显示的Evros Vallis干流纵剖面中存在局部起伏,但其整体呈现下凹的趋势依然十分清晰,河道相对平缓,比降为1.63‰。图5(b)显示整个开都河干流的比降为3.74‰,其纵剖面整体形态可划分为两部分,距河源215 km这一段干流纵剖面形态为下凹型,河道较平缓,比降为2.54‰,从215 km到河口这一段干流纵剖面形态为上凸型,河道较陡峭,比降为5.18‰。河道的形成与发展演变主要受流域水文状况和气候条件、区域构造活动和岩性差异等多种因素的综合影响,其直观表现为河道比降的差异,而河道比降又与流速密切相关。由曼宁经验公式(Manning, 1891)可知,当其他因素不变,比降相差1倍时,同水深的流速将相差41%。Evros Vallis流域干流的河道比降比开都河流域的河道比降小很多,考虑到火星重力约为地球的1/3,重力加速度仅为3.71 m/s<sup>2</sup>(Carr, 2006),这说明Evros Vallis流域有水流动的时期,其流速很可能小于现今开都河流域的流速。河流纵剖面也能够反映河流地貌的发育演化过程(赵洪壮等, 2009): Evros Vallis干流河道纵剖面可被指数函数拟合(回归系数 $R^2$ 为0.9523)开都河

刚刚结束,壮年期才开始的阶段。但是Evros Vallis流域的河网密度和河道密度远小于开都河流域,说明Evros Vallis流域的整体发育程度小于开都河流域。同时,本文根据Hynek等人(2010)人工识别的河网计算出Evros Vallis流域河网分维数为1.68,与本文基于高程数据提取结果计算值1.63一致,这说明同一地区河网分维数不会由于使用不同的数据源而发生改变,它是固定的值,指示了流域的地貌发育阶段,不同数据源代表的可靠程度不同。

干流的两段纵剖面也均可由指数函数拟合(回归系数 $R^2$ 分别为0.9757和0.9784),表明两个流域的河流地貌开始逐渐由壮年早期向壮年期过渡,这与前文河网分维数揭示的整个流域的地貌发育处于幼年期刚结束,壮年期才开始的结论相吻合。



(a) 火星诺亚高地 Evros Vallis  
(a) Evros vallis on Mars



(b) 新疆塔里木盆地开都河流域  
(b) Kaidu river as terrestrial analog

图5 火星和地球类比区流域干流河道纵剖面

Fig. 5 Longitudinal profiles of main stream channel

### 5.3 Evros Vallis成因探讨

河网的形成离不开大量流水，火星表面的河网主要分布于南半球诺亚纪古老高地上，近年来火星表面矿物探测发现含水矿物主要也分布于诺亚纪地层(Bibring等, 2006)，这些均表明火星地质早期有过温暖潮湿的气候。研究人员对Evros Vallis流域流水的来源具有不同的看法，Howard等人(2005)，Hoke和Hynek (2009)以及Caprarelli和Wang (2012)认为该流域是长期稳定的地表径流侵蚀形成的；Som等人(2009)则认为其是短暂出现的湿润环境下形成的。通过定量计算Evros Vallis流域河网水系的形态和水文参数，其河流平均弯曲系数、分叉比、河长比和河网分维数等综合反映流域整体特征参数与地球上自然形成的流域非常相似，均在地球表面河网水系的典型经验值范围内(表1、表2和表3)。这些特征参数表明Evros Vallis很可能是由流水侵蚀地表形成。在地球上，河网的典型分维值在1.5—2.0，平均值为1.6—1.7(La Barbera和Rosso, 1989)，Evros Vallis的河网分维值为1.63(表3)，说明它可能是火星表面一个发育接近常规的流域。

此外，Evros Vallis干流中游和下游的河道内还能观察到滩地(图6具体位置如图1所示)以及网状裂缝和撞击坑(图7)。这些滩地长宽比差异较大，介于1.6—3.4，且可以观察到其形态为非流线型，说明它们为发育程度不高的心滩，为典型河流地貌，这与河网分维数蕴含的地貌发育信息保持一致。除形成季节性坡纹的卤水外(Ojha等, 2015)，目前已基本无法在火星表面观测到液态水，但在过去的几百万年中，当火星达到较高的轴倾角时(30°—35°)，火星表面仍可能出现液态水(de haas等, 2015)。Evros Vallis所在纬度较低(12°S, 12°E)，不太可能被因倾斜进动时产生的冰层覆盖(Fanale等, 1986)，而极可能有水存在于该地区。因此，图7观察到的网状裂缝类似常存在于地球上干涸河道和湖盆中的龟裂或泥裂多边形地貌，如新疆塔里木罗布泊(赵元杰等, 2005；马黎春等, 2011)和美国西部加州的干盐湖(El Maarry等, 2012；El-Maarry等, 2015)。“好奇号”火星车于

2017年1月在火星表面首次发现了一块布满交叉裂纹的岩石，它很可能是30亿年前形成的泥裂，其形态既有多边形又有方形(Stein等, 2017)。泥裂是富含水的沉积物暴露干涸、逐渐收缩形成的(Neuendorf等, 2011)。图7的撞击坑溅射席较同等规模普通撞击坑溅射席大，且其末端有突起壁垒，说明其为壁垒撞击坑，这类撞击坑的形成往往与火星浅表层的水或者冰密切相关(Carr等, 1977)。心滩、泥裂和壁垒撞击坑等地貌特征均间接证实了Evros Vallis曾经有水活动。

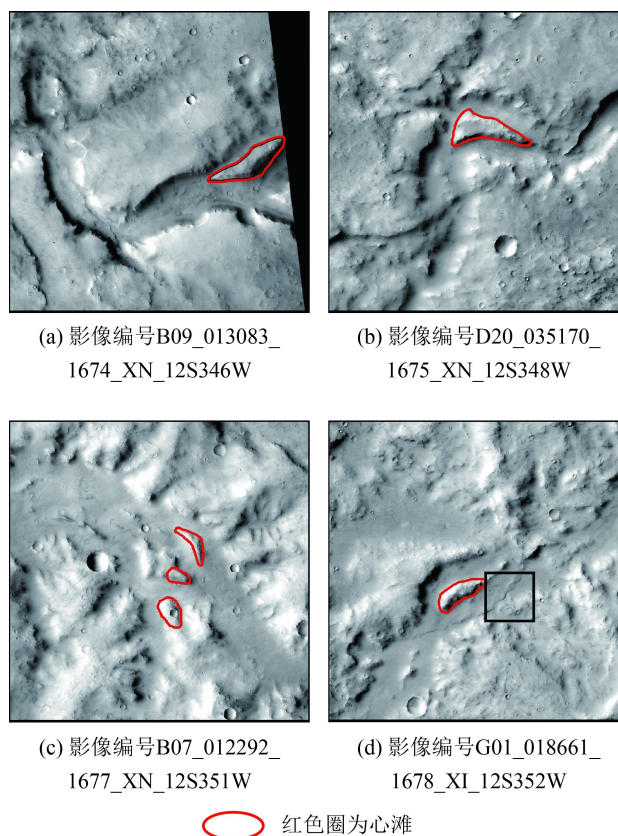


图6 火星Evros Vallis干流河道CTX影像中观察到的心滩  
Fig. 6 Typical fluvial landforms observed on CTX images along main stream in Evros Vallis on Mars

这些定量计算的与地球上自然流域十分类似的形态与水文参数以及遥感影像上观察到的地貌特征强烈指示了该流域是长期水流冲刷侵蚀形成，但是水的来源以及具体持续时间还需进一步结合该流域不同地层的有效厚度、整个流域的流速流量等估算结果以及火星表面区域及全球性古地理和古气候等研究成果才能最终确定。

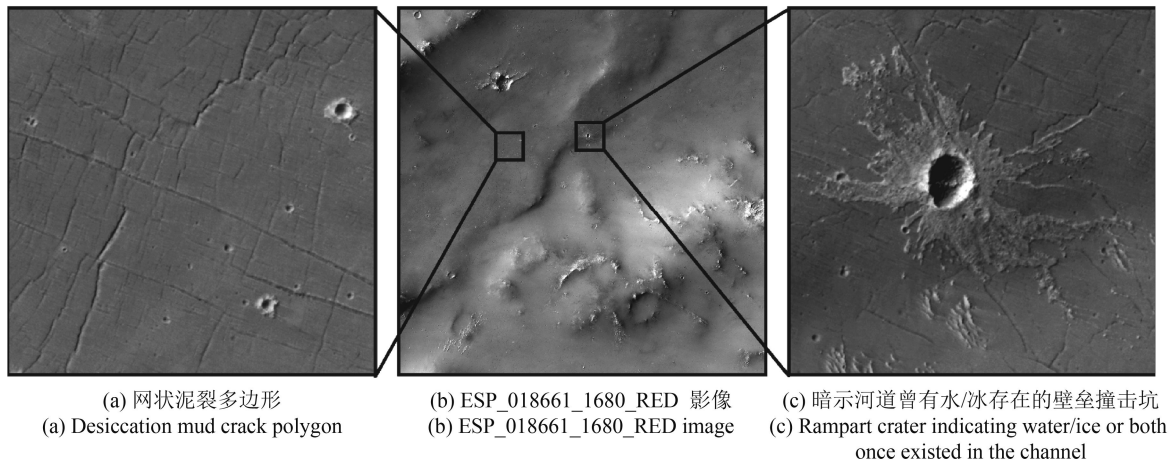


图7 火星Evros Vallis干流下游河道HiRISE影像

Fig. 7 HiRISE imagery along downstream channel in Evros Vallis on Mars

## 6 结论

本文综合利用高精度高程数据和高分辨率遥感影像提取了火星诺亚高地Evros Vallis和地球类比区新疆塔里木盆地开都河流域的河网水系,并定量计算了二者的河网形态和水文参数,通过对比分析主要得到以下结论:

(1) Evros Vallis观察到了典型河流地貌, 及其河流平均弯曲系数、分叉比、河长比和河网分维数等综合反映流域整体形态特征的参数与地球上自然形成的流域(如塔里木盆地的开都河流域)的形态与水文参数非常相似, 这些特征强烈暗示该流域是长期水流冲刷侵蚀形成。

(2) Evros Vallis和开都河流域的地貌发育均处于幼年期刚刚结束, 壮年期才开始的阶段, 但前者整体发育程度小于后者。

另外, 高程数据分辨率会影响河网水系的提取结果, 分辨率过低会导致细小支流无法提取, 但同一地区河网分维数不会由于使用不同的数据源而发生改变, 它是固定的值, 可以稳定指示流域的地貌发育阶段, 不同数据源能代表的可靠程度不同。

在后续研究中, 将利用CTX立体影像生成高精度高分辨率的高程数据, 进而精确量测Evros Vallis流域河道宽度、深度等特征参数, 然后运用河流动力学模型推算流量、含沙量等关键信息, 进一步认识Evros Vallis形成和演化的过程。

## 参考文献(References)

- Bai Z G. 2013. Technical characteristics of GF-1 satellite. *Aerospace China*(8): 5-9 (白照广. 2013. 高分一号卫星的技术特点. *中国航天*(8): 5-9)
- Bai Z P. 1994. Remote sensing study on the changes in Tarim River System. *Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition)*, 15(3): 105-110 (白振平. 1994. 塔里木河水系变迁遥感研究. *首都师范大学学报(自然科学版)*, 15(3): 105-110)
- Baker V R. 2006. Geomorphological evidence for water on Mars. *Elements*, 2(3): 139-143 [DOI: [10.2113/gselements.2.3.139](https://doi.org/10.2113/gselements.2.3.139)]
- Bibring J P, Langevin Y, Mustard J F, Poulet F, Arvidson R, Gendrin A, Gondet B, Mangold N, Pinet P, Forget F and The OMEGA Team. 2006. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. *Science*, 312(5772): 400-404 [DOI: [10.1126/science.1122659](https://doi.org/10.1126/science.1122659)]
- Caprarelli G and Wang B Y. 2012. Wet Mars implications of revised scaling calculations for Evros Vallis. *Australian Journal of Earth Sciences*, 59(2): 263-276 [DOI: [10.1080/08120099.2012.622294](https://doi.org/10.1080/08120099.2012.622294)]
- Carr M H, Crumpler L S, Cutts J A, Greeley R, Guest J E and Marsursky H. 1977. Martian impact craters and emplacement of ejecta by surface flow. *Journal of Geophysical Research*, 82(28): 4055-4065 [DOI: [10.1029/JS082i028p04055](https://doi.org/10.1029/JS082i028p04055)]
- Carr M H and Clow G D. 1981. Martian channels and valleys: their characteristics, distribution, and age. *Icarus*, 48(1): 91-117 [DOI: [10.1016/0019-1035\(81\)90156-1](https://doi.org/10.1016/0019-1035(81)90156-1)]
- Carr M H. 1995. The Martian drainage system and the origin of valley networks and fretted channels. *Journal of Geophysical Research*, 100(E4): 7479-7507 [DOI: [10.1029/95JE00260](https://doi.org/10.1029/95JE00260)]
- Carr M H and Chuang F C. 1997. Martian drainage densities. *Journal of Geophysical Research*, 102(E4): 9145-9152 [DOI: [10.1029/97JE00113](https://doi.org/10.1029/97JE00113)]
- Carr M H and Head III J W. 2003. Basal melting of snow on early



- Mars: a possible origin of some valley networks. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2245 [DOI: [10.1029/2003GL018575](https://doi.org/10.1029/2003GL018575)]
- Carr M H. 2006. *The Surface of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press
- Carter J, Poulet F, Bibring J P, Mangold N and Murchie S. 2013. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: updated global view. *Journal of Geophysical Research*, 118(4): 831–858 [DOI: [10.1029/2012JE004145](https://doi.org/10.1029/2012JE004145)]
- Chen Y N, Takeuchi K, Xu C C, Chen Y P and Xu Z X. 2006. Regional climate change and its effects on river runoff in the Tarim Basin, China. *Hydrological Processes*, 20(10): 2207–2216 [DOI: [10.1002/hyp.6200](https://doi.org/10.1002/hyp.6200)]
- Dong R J, Dong Z B, Wu J F, Guo F and Cui X J. 2013. Evaluation and development on Yadang Landform tourism resources in lop nor of China. *Journal of Desert Research*, 33(4): 1235–1243 (董瑞杰, 董治宝, 吴晋峰, 郭峰, 崔徐甲. 2013. 罗布泊雅丹地貌旅游资源评价与开发研究. *中国沙漠*, 33(4): 1235–1243) [DOI: [10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00174](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-694X.2013.00174)]
- Dong Z B, Qu J J, Qian G Q and Zhang Z C. 2011. Aeolian geomorphological regionalization of the Kumtagh Desert. *Journal of Desert Research*, 31(4): 805–814 (董治宝, 屈建军, 钱广强, 张正德. 2011. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划. *中国沙漠*, 31(4): 805–814)
- Edwards C S, Nowicki K J, Christensen P R, Hill J, Gorelick N and Murray K. 2011. Mosaicking of global planetary image datasets: 1. techniques and data processing for Thermal Emission Imaging System (THEMIS) multi-spectral data. *Journal of Geophysical Research*, 116(E10): E10008 [DOI: [10.1029/2010JE003755](https://doi.org/10.1029/2010JE003755)]
- El Maarry M R, Kodikara J, Wijessoriya S, Markiewicz W J and Thomas N. 2012. Desiccation mechanism for formation of giant polygons on Earth and intermediate-sized polygons on Mars: results from a pre-fracture model. *Earth and Planetary Science Letters*, 323–324: 19–26 [DOI: [10.1016/j.epsl.2012.01.016](https://doi.org/10.1016/j.epsl.2012.01.016)]
- El-Maarry M R, Pommerol A and Thomas N. 2015. Desiccation of phyllosilicate-bearing samples as analog for desiccation cracks on Mars: Experimental setup and initial results. *Planetary and Space Science*, 111: 134–143 [DOI: [10.1016/j.pss.2015.03.021](https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.03.021)]
- Fanale F P, Salvail J R, Zent A P and Postawko S E. 1986. Global distribution and migration of subsurface ice on Mars. *Icarus*, 67(1): 1–18 [DOI: [10.1016/0019-1035\(86\)90170-3](https://doi.org/10.1016/0019-1035(86)90170-3)]
- Feng P and Feng Y. 1997. Calculation on fractal dimension of river morphology. *Acta Geographica Sinica*, 52(4): 324–330 (冯平, 冯焱. 1997. 河流形态特征的分维计算方法. *地理学报*, 52(4): 324–330) [DOI: [10.11821/xb199704005](https://doi.org/10.11821/xb199704005)]
- Gao S and Zhang J. 2006. *Modern geomorphology*. Beijing: Higher Education Press (高抒, 张捷. 2006. *现代地貌学*. 北京: 高等教育出版社)
- Gulick V C. 2001. Origin of the valley networks on Mars: a hydrological perspective. *Geomorphology*, 37(3–4): 241–268 [DOI: [10.1016/S0169-555X\(00\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00086-6)]
- Haas T D, Hauber E, Conway S J, van Steijn H, Johnsson A and Kleinhans M G. 2015. Earth-like aqueous debris-flow activity on Mars at high orbital obliquity in the last million years. *Nature Communications*, 6: 7543 [DOI: [10.1038/ncomms8543](https://doi.org/10.1038/ncomms8543)]
- Han X. 2014. *Quantitative Analysis of Hydrological Characteristics of Kaidu River Basin Based on GIS Technology*. Chengdu: Sichuan Normal University (韩鑫. 2014. *GIS支持下开都河流域水文特征定量分析*. 成都: 四川师范大学)
- He L H and Zhao H. 1996. The fractal dimension of river networks and its interpretation. *Scientia Geographica Sinica*, 16(2): 124–128 (何隆华, 赵宏. 1996. 水系的分形维数及其含义. *地理科学*, 16(2): 124–128) [DOI: [10.13249/j.cnki.sgs.1996.02.004](https://doi.org/10.13249/j.cnki.sgs.1996.02.004)]
- Hellweger F. 1997. AGREE-DEM surface reconditioning system. [2017-01-03]. <http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHY-DRO/ferdi/research/agree/agree.html>
- Hoke M R T and Hynes B M. 2009. Roaming zones of precipitation on ancient Mars as recorded in valley networks. *Journal of Geophysical Research*, 114(E8): E08002 [DOI: [10.1029/2008JE003247](https://doi.org/10.1029/2008JE003247)]
- Horton R E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *GSA Bulletin*, 56(3): 275–370 [DOI: [10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2)]
- Howard A D, Moore J M and Irwin III R P. 2005. An intense terminal epoch of widespread fluvial activity on early Mars: 1. Valley network incision and associated deposits. *Journal of Geophysical Research*, 110(E12): E12S14 [DOI: [10.1029/2005JE002459](https://doi.org/10.1029/2005JE002459)]
- Hynes B M, Beach M and Hoke M R T. 2010. Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research*, 115(E9): E09008 [DOI: [10.1029/2009JE003548](https://doi.org/10.1029/2009JE003548)]
- Irwin III R P, Craddock R A and Howard A D. 2005. Interior channels in Martian valley networks: discharge and runoff production. *Geology*, 33(6): 489–492 [DOI: [10.1130/G21333.1](https://doi.org/10.1130/G21333.1)]
- Irwin III R P and Howard A D. 2002. Drainage basin evolution in Noachian Terra Cimmeria, Mars. *Journal of Geophysical Research*, 107(E7): 10-1–10-23 [DOI: [10.1029/2001JE001818](https://doi.org/10.1029/2001JE001818)]
- Irwin III R P, Howard A D and Craddock R A. 2008. Fluvial valley networks on Mars//Rice S, Roy A and Rhoads B, eds. *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*. Chichester, UK: Wiley: 419–451
- Jin J, Dong G R and Shen J Y. 1994. The contemporary climate of Tarim Basin, XinJiang. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 8(3): 12–21 (金炯, 董光荣, 申建友. 1994. 新疆塔里木盆地的现代气候状况. *干旱区资源与环境*, 8(3): 12–21) [DOI: [10.13448/j.cnki.jalre.1994.03.002](https://doi.org/10.13448/j.cnki.jalre.1994.03.002)]
- Kong F Z and Li L L. 2005. Determination of river drainage area threshold for extraction of drainage network by DEM. *Water Resources and Power*, 23(4): 65–67 (孔凡哲, 李莉莉. 2005. 利用

- DEM提取河网时集水面积阈值的确定. 水电能源科学, 23(4): 65–67
- La Barbera P and Rosso R. 1989. On the fractal dimension of stream networks. *Water Resources Research*, 25(4): 735–741 [DOI: [10.1029/WR025i004p00735](https://doi.org/10.1029/WR025i004p00735)]
- Luo W and Stepinski T F. 2009. Computer-generated global map of valley networks on Mars. *Journal of Geophysical Research*, 114(E11): E11010 [DOI: [10.1029/2009JE003357](https://doi.org/10.1029/2009JE003357)]
- Ma L C, Li B G, Jiang P A, Sheng J D, Zhong J P, Qiu H L and Wu H Q. 2011. Sedimentary features, origin and paleoenvironmental significance of “Great Ear” salt pans in the Lop Nur Playa. *Acta Sedimentologica Sinica*, 29(1): 125–133 (马黎春, 李保国, 蒋平安, 盛建东, 钟俊平, 邱宏烈, 武红旗. 2011. 罗布泊盐湖“大耳朵”盐盘特征、成因及古环境意义. *沉积学报*, 29(1): 125–133) [DOI: [10.14027/j.cnki.cjxb.2011.01.009](https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2011.01.009)]
- Malin M C, Bell III J F, Cantor B A, Caplinger M A, Calvin W M, Clancy R T, Edgett K S, Edwards L, Haberle R M, James P B, Lee S W, Ravine M A, Thomas P C and Wolff M J. 2007. Context camera investigation on board the Mars reconnaissance orbiter. *Journal of Geophysical Research*, 112(E5): E05S04 [DOI: [10.1029/2006JE002808](https://doi.org/10.1029/2006JE002808)]
- Manning R. 1891. On the flow of water in open channels and pipes. *Transactions of the Institution of Civil Engineers of Ireland*, 20: 161–207
- McCauley J F, Carr M H, Cutts J A, Hartmann W K, Masursky H, Milton D J, Sharp R P and Wilhelms D E. 1972. Preliminary Mariner 9 report on the geology of Mars. *Icarus*, 17(2): 289–327 [DOI: [10.1016/0019-1035\(72\)90003-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(72)90003-6)]
- McEwen A S, Eliason E M, Bergstrom J W, Bridges N T, Hansen C J, Delamere W A, Grant J A, Gulick V C, Herkenhoff K E, Keszthelyi L, Kirk R L, Mellon M T, Squyres S W, Thomas N and Weitz C M. 2007. Mars reconnaissance orbiter’s high resolution imaging science experiment (HiRISE). *Journal of Geophysical Research*, 112(E5): E05S02 [DOI: [10.1029/2005JE002605](https://doi.org/10.1029/2005JE002605)]
- McSween Jr H Y. 2006. Water on Mars. *Elements*, 2(3): 135–137 [DOI: [10.2113/gselements.2.3.135](https://doi.org/10.2113/gselements.2.3.135)]
- Neuendorf K K E, Mehl Jr J P and Jackson J A. 2011. *Glossary of Geology*. 5th ed. Alexandria, Virginia: American Geosciences Institute
- Neumann G A, Rowlands D D, Lemoine F G, Smith D E and Zuber M T. 2001. Crossover analysis of Mars orbiter laser altimeter data. *Journal of Geophysical Research*, 106(E10): 23753–23768 [DOI: [10.1029/2000JE001381](https://doi.org/10.1029/2000JE001381)]
- O’Callaghan J F and Mark D M. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3): 323–344 [DOI: [10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0)]
- Ojha L, Wilhelm M B, Murchie S L, McEwen A S, Wray J J, Hanley J, Massé M and Chojnacki M. 2015. Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nature Geoscience*, 8(11): 829–832 [DOI: [10.1038/ngeo2546](https://doi.org/10.1038/ngeo2546)]
- Som S M, Montgomery D R and Greenberg H M. 2009. Scaling relations for large Martian valleys. *Journal of Geophysical Research*, 114(E2): E02005 [DOI: [10.1029/2008JE003132](https://doi.org/10.1029/2008JE003132)]
- Stein N, Grotzinger J P, Schieber J, Mangold N, Newsom H, Minitti M, Sumner D, Edgett K S, Stack K, Fedo C, Gupta S, Hallet B, Vasavada A and Fey D. 2017. Candidate desiccation cracks in the upper murray formation, gale crater, Mars//*Proceedings of the 48th Lunar and Planetary Science*. The Woodlands, Texas: Lunar and Planetary Institute: 2387
- Stepinski T F, Collier M L, McGovern P J and Clifford S M. 2004. Martian geomorphology from fractal analysis of drainage networks. *Journal of Geophysical Research*, 109(E2): E02005 [DOI: [10.1029/2003JE002098](https://doi.org/10.1029/2003JE002098)]
- Stepinski T F, Marinova M M, McGovern P J and Clifford S M. 2002. Fractal analysis of drainage basins on Mars. *Geophysical Research Letters*, 29(8): 30-1–30-4 [DOI: [10.1029/2002GL014666](https://doi.org/10.1029/2002GL014666)]
- Strahler A N. 1958. Dimensional analysis applied to fluvially eroded landforms. *Geological Society of America Bulletin*, 69(3): 279–300 [DOI: [10.1130/0016-7606\(1958\)69\[279:DAATFE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1958)69[279:DAATFE]2.0.CO;2)]
- Tachikawa T, Kaku M, Iwasaki A, Gesch D B, Oimoen M J, Zhang Z, Danielson J J, Krieger T, Curtis B, Haase J, Abrams M and Carbajal C. 2011. ASTER Global Digital Elevation Model Version 2—Summary of Validation Results. [Washington, D. C.]: NASA: 27
- Tang Y J, Jia J Y and Xie X D. 2002. Environment significance of clay minerals. *Earth Science Frontiers*, 9(2): 337–344 (汤艳杰, 贾建业, 谢先德. 2002. 黏土矿物的环境意义. *地学前缘*, 9(2): 337–344) [DOI: [10.3321/j.issn:1005-2321.2002.02.011](https://doi.org/10.3321/j.issn:1005-2321.2002.02.011)]
- Wang M L, Liu C L and Jiao P C. 2006. Investigation and scientific research progress and exploitation Present Situation of Lop Nur Salty Lake Potash Deposits, Xinjiang, China. *Geological Review*, 52(6): 757–764 (王弭力, 刘成林, 焦鹏程. 2006. 罗布泊盐湖钾盐矿床调查科研进展与开发现状. *地质论评*, 52(6): 757–764) [DOI: [10.3321/j.issn:0371-5736.2006.06.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:0371-5736.2006.06.005)]
- Xiao L, Wang J, Dang Y N, Cheng Z Y, Huang T, Zhao J N, Xu Y, Huang J, Xiao Z Y and Komatsu G. 2017. A new terrestrial analogue site for Mars research: the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 164: 84–101 [DOI: [10.1016/j.earscirev.2016.11.003](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.11.003)]
- Zhang Y L, Chen Y N, Yang Y H and Hao X M. 2016. Analysis of historical change and future trends of Tarim River. *Arid Land Geography*, 39(3): 582–589 (张永雷, 陈亚宁, 杨玉海, 郝兴明. 2016. 塔里木河河道的历史变迁及驱动力分析. *干旱区地理*, 39(3): 582–589) [DOI: [10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.03.015](https://doi.org/10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.03.015)]
- Zhao H Z, Li Y L, Yang J C and Lv H H. 2009. The longitudinal profiles of the Ten Rivers in North Tianhan Mountains and their tectonic significance. *Acta Geographica Sinica*, 64(5): 563–570 (赵洪壮, 李有利, 杨景春, 吕红华. 2009. 天山北麓河流纵剖面与基岩侵蚀模型特征分析. *地理学报*, 64(5): 563–570) [DOI: [10.3321/j.issn:0375-5444.2009.05.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:0375-5444.2009.05.005)]

Zhao Y J, Xia X C, Wang F B, Cao Q Y and Lv Z Z. 2005. Preliminary study on the geomorphological characteristic and formation cause of modern salt crust type in Lop Nur Region. *Arid Land Ge-*

*ography*, 28(6): 795–799 (赵元杰, 夏训诚, 王富葆, 曹琼英, 吕昭智. 2005. 罗布泊现代盐壳地貌特征与成因初步研究. *干旱区地理*, 28(6): 795–799) [DOI: [10.3321/j.issn:1000-6060.2005.06.014](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-6060.2005.06.014)]

## Quantitative comparison of morphometric and hydrological characteristics of valley networks between Evros Vallis on Mars and Kaidu River in Tarim Basin as terrestrial analog

GOU Sheng<sup>1,2</sup>, YUE Zongyu<sup>1</sup>, DI Kaichang<sup>1</sup>, XU Yi<sup>2</sup>

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Lunar and Planetary Science Laboratory, Macau University of Science and Technology — Partner Laboratory of Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences, Macau 519020, China

**Abstract:** The evolution process of the generation, development, and extinction of valley networks on Mars and its analog on Earth should be understood by conducting a comparative study from the viewpoint of comparative planetology, which may be ultimately meaningful for exploring the ancient life relics on Mars. The valley networks of Evros Vallis on Mars and Kaidu River in the Tarim Basin in Xinjiang are extracted from the Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) and ASTER Global Digital Elevation Map (ASTER GDEM) data. Then, the morphometric and hydrological parameters, namely, the mean length of tributaries at all levels, mean sinuosity at all levels, drainage density, channel density, river gradient, and stream fractal dimension of the entire valley networks, are calculated and compared. Both valley networks are quasi-dendritic valley systems, and the quantitative calculation results show the following. (1) The mean length of tributaries at all levels of Evros Vallis is 1.4 to 2.5 times longer than that of Kaidu River, which indicates that the scale of Evros Vallis is generally larger. (2) The average of the mean sinuosity of tributaries at all levels of Evros Vallis is 1.19, which indicates straightness; that of Kaidu River is sinuous and larger, with an average value of 1.35. (3) The stream fractal dimensions of Evros Vallis and Kaidu River are 1.63 and 1.70, respectively, which demonstrates that the geomorphic development stage of both drainage basins is at the end of topographic infancy and the beginning of maturity. However, the drainage and channel densities of the former are much smaller than those of the latter, indicating that the overall development stage of the former is less than that of the latter. (4) The longitudinal profile of Evros Vallis shows a concave-down trend with a relative gentle channel. Its river gradient is 1.63‰, and the river gradient of Kaidu River is 3.74‰. Its longitudinal profile can be divided into two as follows: the source section is concave-down, with a gentle channel and river gradient of 2.54‰, and the estuary section is concave-up, with a steep channel and river gradient of 5.18‰. The morphometric and hydrologic parameters of Evros Vallis on Mars are similar to those of natural rivers on Earth. In addition, fluvial landforms are found in the main stream channel, desiccation mud crack polygons, and rampart craters of Evros Vallis, showing that water and/or ice once existed when Evros Vallis was dry, as observed on the downstream channel. These features strongly suggest that this drainage area was formed by a long time of runoff erosion. However, the water source and duration still require further studies by combining the research outcomes in regional and global paleogeography and paleoclimate.

**Key words:** Martian surface, Evros Vallis, Kaidu river, morphometric characteristics, hydrological characteristics, quantitative comparison

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. 41702354); Opening Fund of Lunar and Planetary Science Laboratory, Macau University of Science and Technology — Partner Laboratory of Key Laboratory of Lunar and Deep Space Exploration, Chinese Academy of Sciences (No. 039/2013/A2); Youth Talent Project of State Key Laboratory of Remote Sensing Science (No. 16RC-07)