

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.124>



火星峡谷网研究的现状、问题与展望

史语桐, 杨 勇, 赵健楠, 黄 俊, 肖 龙*

中国地质大学地球科学学院行星科学研究所, 湖北武汉 430074

摘 要: 广泛分布于火星表面的谷网地貌作为火星地质环境演变的记录者, 对认识火星地质历史时期的环境变化、了解火星古气候与宜居性具有重要意义. 随着中国火星探测计划的开展, 详细了解火星谷网的研究进展尤为重要. 对火星谷网地貌的探测历史、形貌分类、时空分布、成因假说等方面的研究进展进行了总结, 在此基础上提出了当前火星谷网研究中存在的主要问题与争议, 并认为未来可着重在谷网侵蚀沉积物的识别分析、谷网对古气候重建所提供的地质学证据与理论模型预测结果的协调、以及火星与地球谷网的类比等方面开展研究.

关键词: 火星; 峡谷网; 水源; 古气候; 流水活动; 行星地质.

中图分类号: P691

文章编号: 1000-2383(2024)01-359-16

收稿日期: 2022-03-14

Achievements, Issues and Prospects in the Study of Martian Valley Networks

Shi Yutong, Yang Yong, Zhao Jiannan, Huang Jun, Xiao Long*

Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: As a record of the evolution of the Martian geological environment, the widely-distributed valley networks on the surface of Mars are of great significance to the understanding of the environmental changes, paleoclimate, and habitability of Mars over geologic time. With the development of China's Mars exploration program, it is important to understand the research status of this one of the most extensive Martian fluvial landforms in detail. In this paper, we reviewed the research progress on the exploration history, morphological classification, spatial and temporal distribution, and formation hypotheses of Martian valley networks, on the basis of which, we summarized the main problems and controversies in the current research, and suggested that the future studies may focus on the identification and analysis of valley networks' erosional sediments, the reconciliation of the geological observations and theoretical modeling, and analog studies between Martian valley networks and terrestrial counterparts.

Key words: Mars; valley network; water source; paleoclimate; fluvial activity; planetary geology.

火星作为毗邻地球的类地行星之一, 一直是科学研究的热点和航天探测的目标. 现今的火星寒冷干旱, 表面温压条件不利于液态水的稳定存在. 在大部分情况下, 火星水以气态或固态的形式赋存, 主要分布在两极冰盖 (Bibring *et al.*, 2004; Byrne,

2009)、中纬地区埋藏冰川 (Holt *et al.*, 2008) 和表土之下的地下冰层 (Mellon *et al.*, 2004; Dundas *et al.*, 2018). 暴露在火星表面的水冰会直接升华为水蒸气, 故地表的活跃流水作用在火星极为少见, 仅有反复出现的季节性斜坡纹 (RSL), 说明目前干旱

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 42002305, 41830214, 42241111); 民用航天技术预先研究项目 (No.D020101); 中国博士后科学基金面上项目 (No.2021M702999).

作者简介: 史语桐 (1997—), 女, 博士研究生, 主要从事行星地质学研究. ORCID: 0000-0002-4277-1028. E-mail: ytshi@cug.edu.cn

* 通讯作者: 肖龙, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

引用格式: 史语桐, 杨勇, 赵健楠, 黄俊, 肖龙, 2024. 火星峡谷网研究的现状、问题与展望. 地球科学, 49(1): 359-374.

Citation: Shi Yutong, Yang Yong, Zhao Jiannan, Huang Jun, Xiao Long, 2024. Achievements, Issues and Prospects in the Study of Martian Valley Networks. *Earth Science*, 49(1): 359-374.

的火星或许仍存在小规模的地表水活动(McEwen *et al.*, 2011; Schaefer *et al.*, 2019; 刘洋等, 2021), 近期研究也提出 RSL 形成于风沙活动所引发的重力流(McEwen *et al.*, 2011), 故 RSL 对地表水活动的指示作用仍有待商榷. 反观地质历史时期, 包括谷网、外流渠道和古湖泊等遗留于火星表面的流水地貌表明了地表流水作用在早期火星的广泛存在(Carr, 2012). 其中, 主要形成于诺亚纪的谷网是火星流水地貌研究的热点之一, 谷网作为火星地质环境演变的记录者, 能够为认识火星地质历史时期的环境变化、了解火星古气候与宜居性提供线索. 谷网的形态能够指示其水源类型与气候背景(Craddock and Howard, 2002, 2017; Luo and Howard, 2008; Ansan and Mangold, 2013; Seybold *et al.*, 2018; Galofre *et al.*, 2020; Shi *et al.*, 2022), 谷网的分布与年龄则指示了火星地质历史时期地表流水的分布范围与存在时间(Fassett and Head, 2008; Di Achille and Hynek, 2010; Chan *et al.*, 2018), 针对谷网形成演化的数值模拟同样能够为其气候环境背景提供制约(Wordsworth *et al.*, 2013; Halevy and Head, 2014; Palumbo and Head, 2018; Cassanelli and Head, 2019; Ramirez *et al.*, 2020). 目前针对火星谷网的研究大多从谷网的形貌与分布特征入手, 以形态观测和数值模拟为主要手段, 从而展开关于谷网水源类型与成因机制的讨论, 为认识火星早期气候特征和诺亚纪-西方纪之交的环境变化提供线索.

1 火星谷网探测和研究历史

发射于 1971 年的“水手 9 号(Mariner 9)”探测器首次在火星表面拍摄到类似于地球河流和峡谷网的地貌. 随后, 在 1975 年发射的“海盗 1 号(Viking 1)”和“海盗 2 号(Viking 2)”探测器则通过其搭载的更高分辨率相机获取了约 200 m 每像素分辨率的火星全球影像, 并证明了谷网地貌在火星表面的广泛分布. 由于早期探测所获得的影像分辨率有限, 且缺乏物质成分和高程数据, 这些谷网地貌的成因在早期研究中存在许多争议, 在地表流水作用之外, 相关成因假说还包括熔岩流侵蚀(Carr, 1974)、构造运动(Schumm, 1974)和冰川作用(Lucchitta, 1980, 1983). 后期的探测逐步获得了火星大气成分和物理参数的更多数据, 结合气候模型分析, 证实了液态水是火星谷

网地貌的最可能成因, 由此引发了关于火星早期气候变化的讨论(Sagan *et al.*, 1973; Toon *et al.*, 1980; Baker *et al.*, 1991; McKay and Davis, 1991; Clifford, 1993; Carr, 1995; Kasting, 1997).

20 世纪以来, 随着成像探测技术的发展和激光高度计技术在火星探测中的应用, 关于火星谷网地貌的认识取得了长足进展. 美国火星奥德赛搭载的热辐射成像系统(THEMIS), 欧洲“火星快车号”搭载的高分辨率立体相机(HRSC)获得了覆盖火星全球的遥感影像, 为探明谷网地貌在全球的空间分布提供了数据支持; 而美国火星勘测轨道飞行器搭载的背景相机(CTX)和高分辨率成像科学设备(HiRISE)所获得的分辨率高达 0.3 m 每像素的区域影像则为谷网细节形貌的研究提供了可能. 分别搭载于美国火星勘测轨道飞行器和“火星快车号”的小型侦察成像光谱仪(CRISM)和可见-红外矿物制图光谱仪(OMEGA)获得了大量表面矿物成分数据, 含水蚀变矿物的发现进一步为火星早期的地表流水活动提供了证据. 在遥感探测之外, 以“好奇号”、“毅力号”为首的一系列就位探测任务也在火星表面收集到大量高分辨率影像和成分数据, 对各个着陆区的岩石种类和沉积过程开展了详细的分析, 为火星早期气候环境背景提供了更多线索, 也为谷网的水源和成因机制提供了指示.

现今火星仍然是国际深空探测的热点目标, 我国于 2020 年成功发射了探测器“天问一号”, 并一次性完成对火星的环绕、着陆、和巡视探测, 美国、欧盟、印度、俄罗斯等国也均有开展或计划开展火星探测任务(Zhao *et al.*, 2020), 这些探测任务所获得的更为多样、精度更高的探测数据将有望为探明火星地质历史时期水活动记录与环境宜居性提供新的线索.

2 当前火星谷网研究的主要成果

2.1 谷网的全球分布

前人曾对火星谷网的分布进行过多次全球性的识别与统计工作. Carr and Chuang(1997)基于“海盗号”探测器获得的影像人工识别并绘制了首张火星谷网的全球分布图, 识别出的支流数量达 11 336 条. 但受限于早期影像的分辨率与地形数据的缺乏, 填图结果在较细尺度上仍有较大的改进空间. 后期 Carr(2012)结合新的探测数据对早期的填图结果进行了补充修正, 对原有谷网补充了更多

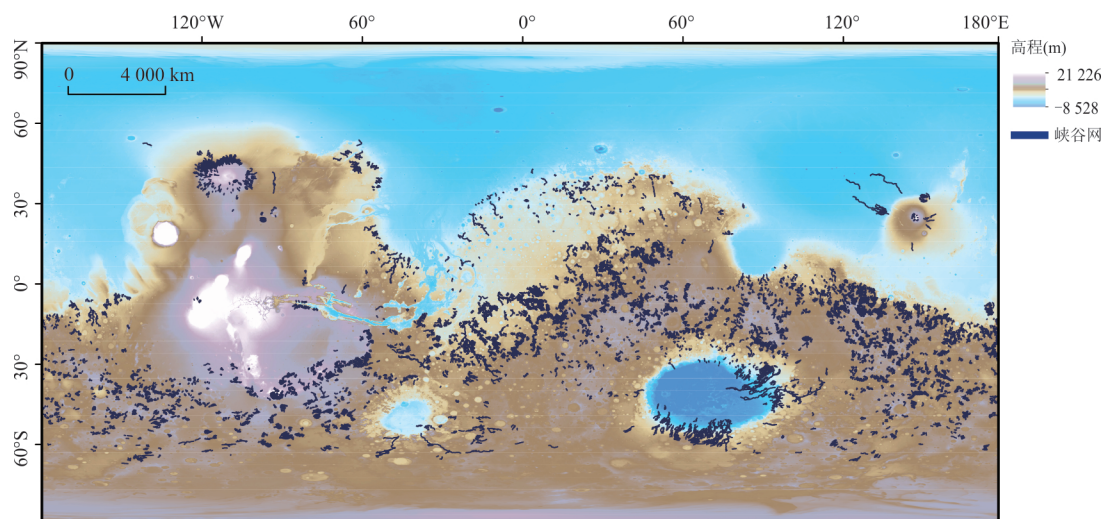


图1 火星谷网的全球分布

Fig.1 The global distribution of Martian valley networks

谷网识别数据源自 Alemanno *et al.* (2018). 背景图为据 MOLA 数据制作的彩色地形图

的细小支流,并在 Elysium 区域和 Tharsis 区域新增了呈放射状分布在火山周边的谷网。

近年来, Luo and Stepinski (2009) 开展了谷网的自动识别工作。他们利用火星全球探勘者 (MGS) 463 m/pixel 分辨率的 MOLA 高程数据,在全球范围内提取出火星表面的线性凹陷,然后人工筛选出属于谷网的凹陷。这一填图结果扩展了对火星谷网全球分布情况的认识,通过其方法最终识别出支流数量达 375 550 条,获得的水系总长度是 Carr and Chuang (1997) 统计结果的近 2.3 倍。此外, Hynek *et al.* (2010) 结合 MOLA 高程数据与火星奥德赛 200 m 每像素的 THEMIS 影像,通过人工识别的方法对上述识别结果进行了进一步的修正和细化,并讨论了谷网密度与表面沉积物分布的关联性。最新关于火星谷网全球分布的研究为 Alemanno *et al.* (2018) 完成的火星谷网全球填图,他们基于 MOLA 高程数据与 100 m 每像素的 THEMIS 影像对火星谷网的全球分布进行了人工识别,并在局部区域使用 6 m 每像素的 CTX 影像作为补充,在前人填图基础上识别出了更多细小谷网,并对已有谷网补充了更高的支流等级,最终识别出的水系总长度达 773 559 km (图 1)。此外, Alemanno *et al.* (2018) 还对识别出的谷网进行了形态分类,并结合 Tanaka *et al.* (2014) 的火星全球地质图统计了谷网形成的地质年代。

上述多次基于不同数据和不同方法的谷网识别获得了关于火星谷网全球分布情况较为一致的

认识。谷网多分布于火星南半球撞击坑密集的古老高地,在年轻的北半球平原则难寻踪迹。谷网在不同区域间不均匀分布,在 Arabia 地区、Hellas 西部和南部的谷网数量稀少,但在赤道一带分布相对密集。

2.2 谷网的形貌特征

形态特征方面,谷网的宽度多为几千米,深度一般为 50~200 m,长度可达上百甚至上千千米。例如, Marikh 谷是火星表面最长的谷网之一,它干流长约 1 200 km,从火星南部的诺亚高地 (Noachis Terra) 一直延伸到北部的子午线高原 (Meridiani Planum)。火星谷网一般具有陡峭的岩壁,横断面由上游的 V 形过渡到下游的 U 形至开阔矩形,多发育有短而深切的分支。但峡谷网的横截面形态很容易受到后期改造作用的影响而显示出多样性。火星峡谷网的深度在从 <1 m 到 >400 m 的较大范围内变化,大多数峡谷网的深度在 50~200 m 之间,同时往往能够在较长的距离内保持深度的相对恒定 (Williams and Phillips, 2001)。

Alemanno *et al.* (2018) 在全球谷网识别的基础上,根据谷网的形貌特征和分布将火星谷网划分为 6 个类型: (1) 峡谷网络 (valley networks): 即发育有较复杂树枝状分支系统的谷网; (2) 径向河谷 (longitudinal valleys): 即以一条较长干流为主,两侧仅有少量较短支流的河谷; (3) 与火山有关的河谷 (valleys on volcanos): 此类河谷聚集分布在火山侧翼上,形貌上以形态简单的小型谷网和单支河谷为主; (4) 与裂谷有关的河谷 (valleys related to rifts): 即大

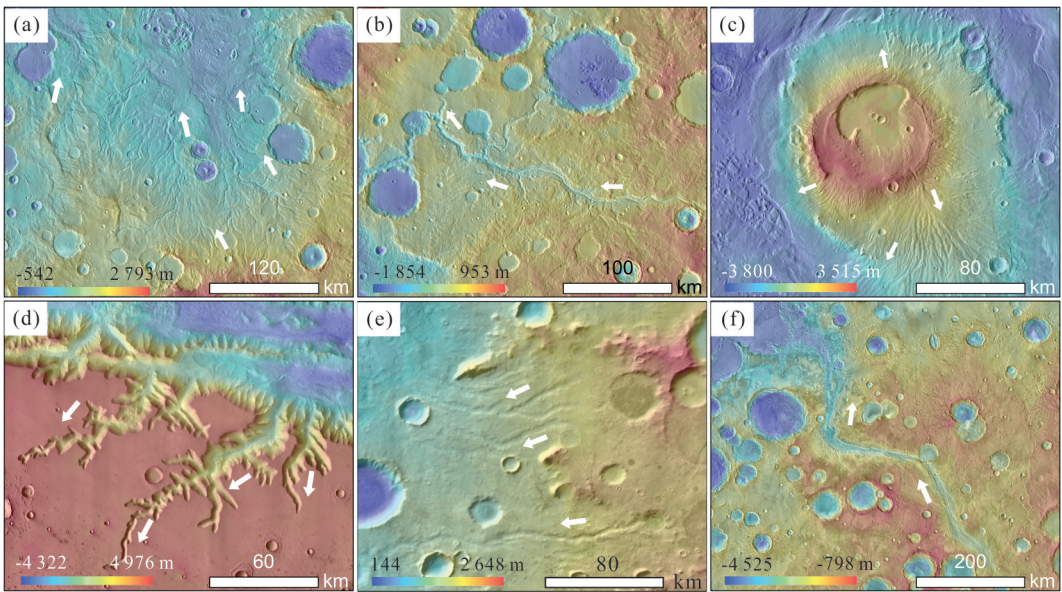


图2 几种常见的火星谷网形貌类型

Fig.2 Commonly observed morphological types of Martian valley networks

a. 峡谷网络 (valley networks, 47°10'44"E, 9°18'4"N); b. 径向河谷 (longitudinal valleys, 38°45'18"E, 19°11'5"N); c. 与火山有关的河谷 (valleys on volcanoes, 174°17'15"E, 8°44'5"S); d. 与裂谷有关的河谷 (valleys related to rifts, 84°40'22"W, 8°15'42"S); e. 单支河谷或谷网段 (single valleys and valley segments, 140°0'52"W, 63°20'53"S); f. 小型外流渠道 (small outflow channels, 16°13'28"W, 22°10'15"N). 白色箭头标注在谷网旁, 其指向代表谷网流向. 背景图为 THEMIS 影像叠加 MOLA 高程数据, 由红色过渡到蓝色表示高程降低. 谷网形貌类别的划分引自 Alemanno *et al.* (2018)

型裂谷延伸出的较小支流所形成的河谷, 如与卡塞谷和水手峡谷所相连的谷网; (5) 单支河谷或谷网段 (single valleys and valley segments): 即不发育分支或只发育一级支流的简单河谷; (6) 小型外流渠道 (small outflow channels): 此类河谷具有与外流渠道相似的平面形貌和类似的源头特征, 但规模相较一般外流渠道更小 (图 2). 上述分类较大程度地依据了谷网的水系类型特征, 对谷网形成的地质和气候背景均有一定的指示作用.

2.3 谷网的形成年龄

谷网的年代学对于认识火星水环境的演化有着重要意义. 不同的填图结果得到的谷网年龄略有不同, 但总体特征一致. 根据 Carr and Chuang (1997) 的水系分布图, 90% 的谷网分布在诺亚纪地质单元中. Hynek *et al.* (2010) 的结果表明, 91% 的谷网分布在诺亚纪单元, 6% 分布在西方纪单元, 剩余 3% 则分布在亚马逊纪地质单元内. Alemanno *et al.* (2018) 的统计结果显示则有高达 94% 的谷网分布在诺亚纪区域. Fassett and Head (2008) 通过缓冲区撞击坑统计方法对火星全球范围内 30 处谷网系统的形成年龄进行了制约, 发现分布在南部高原上的谷网的形成时间均为早西方世或更早, 谷网活动

大多停止于诺亚纪-西方纪之交, 未发现晚西方世及之后形成的谷网地貌. 在南部高原之外, 一些孤立分布在火山侧翼、年轻撞击坑壁、或水手峡谷壁上的谷网则具有晚西方世-早亚马逊世的年轻年龄, 说明其形成在诺亚纪-西方纪之交的谷网形成峰期之后, 其成因更有可能与诸如火山活动导致的积雪融化等局部小范围的气候事件有关.

2.4 谷网对火星早期气候的指示

谷网的形貌参数、形成时间、分布特点等特征均能在不同程度上对谷网形成的气候环境提供指示. 对火星谷网的年代学研究显示, 大部分谷网活动发生在诺亚纪-西方纪之交 (Fassett and Head, 2008), 因此谷网的形态和分布特征可以成为研究诺亚纪晚期以及诺亚纪向西方纪过渡时期的气候变化情况的窗口.

2.4.1 谷网形貌对气候的指示 许多谷网的形貌参数对其形成的气候背景具有直接的指示意义. 例如, 谷网的水系等级代表了谷网分支的复杂程度 (Strahler, 1957), 更高等级的水系系统往往对应于更长期的河流发展时间和更暖湿的气候. 分支夹角同样能够指示谷网形成时气候的干旱程度: Seybold *et al.* (2018) 通过对地球不同气候区河流分支

夹角的统计显示,谷网的平均分支夹角在干旱区约为 45° ,而在潮湿区约为 72° 。相比之下,基于不同识别方法所获得的火星谷网平均分支夹角均在 $40^{\circ}\pm 5^{\circ}$ 范围内(Luo and Stepinski, 2009; Hynek *et al.*, 2010),说明火星谷网可能形成于类似地球干旱区大陆性气候的环境中,水源供给主要依靠间歇性的强降水(Seybold *et al.*, 2018)。而Galofre *et al.* (2020)则通过数值模拟建立了表面流水作用、冰川作用、地下水基蚀作用、冰下河作用4种不同成因谷网的形貌参数标准,包括分支夹角、分形维度、最大水系等级、河道长宽比、以及纵剖面起伏程度,在此基础上通过主元分析法讨论了不同机制在火星谷网形成中的参与程度。其结果显示冰下径流作用在火星谷网的形成中或许有着广泛的影响,指示了表面冰层广泛存在的干冷早期环境(Galofre and Jellinek, 2017a, 2017b; Galofre *et al.*, 2020)。

谷网的剖面形态也能在一定程度上反映其水源与气候背景。河谷的纵剖面形态可作为区别冰川与流水成因的重要标志。冰槽谷由山岳冰川向下流动切割地表而成,其纵剖面整体倾向与冰川移动方向一致,表面岩坎与洼地交替频繁、高低不平,甚至在局部表现出逆冲反向的特征,许多具有上述特征的火星谷网由此被解释为冰川成因(Galofre *et al.*, 2020)。冰蚀谷在纵剖面上的巨大起伏显著区别于降水成因的流水河谷,后者往往具有相对光滑的纵剖面,随河谷发展逐渐趋近圆滑下凹的均衡形态(Anderson *et al.*, 2006)。河谷的横剖面形态以及所反映的流域间不同的宽度和深度也能够反映不同气候背景下水源供给的差别。暖湿区域降水成因的河谷从上游至下游多表现为宽度加大、深度变浅,横剖面整体呈V型;干旱区域地下水渗流成因的谷网的宽度向下游多保持恒定;而寒冷气候下的冰蚀谷则具有典型的U型横剖面。目前具有上述不同形态横剖面的谷网在火星表面均有发现(Goldspiel and Squyres, 2000; Craddock and Howard, 2002; Ramirez and Craddock, 2018; Shi *et al.*, 2022),说明火星谷网的形成可能包含多种水源的共同参与。

不同的水源特征往往能够指示不同的气候背景。地表径流侵蚀代表着温暖且有丰富液态水的环境(Craddock and Howard, 2002; Ramirez and Craddock, 2018);地下水基蚀则常代表着由温暖湿润逐渐转变为寒冷干燥,且缺失地表流水的环境(Harrison and Grimm, 2005; Lapotre and Lamb, 2018);

而冰川侵蚀、冰雪融水侵蚀与冰下河侵蚀代表的是寒冷、表面覆盖冰雪的环境(Wordsworth *et al.*, 2013; Galofre *et al.*, 2020)。具有上述水源特征的谷网在火星表面均有发现,说明火星的早期气候有可能并非单一,而是存在地区差异或季节变化。

2.4.2 谷网分布特征对气候的指示 在不同气候与水源的影响下,谷网的空间分布也表现出一定差异。例如,降水成因的谷网多发源自撞击坑壁顶缘等地势相对高点,而地下水主导的谷网则多发源于潜水面与地表相交的低洼地带,冰雪融水供给谷网的源头则通常位于斜坡中部,雪线附近(Ramirez and Craddock, 2018)。谷网的流向与地表坡向的一致程度也可用作判断其成因的依据。地表流水成因的谷网应具有同地势坡向一致的流向,而干冷气候下冰下径流的流向则可能与表面地势坡向不一致,甚至方向相反,因为冰下径流的流向往往代表其上覆冰层的表面坡向,而非地表的地形起伏。据此,Bahia *et al.* (2022)对火星阿吉尔盆地(Argyre Basin)谷网流向与地势坡向进行了一致性分析,发现许多逆坡向延伸谷网在盆地内的零星分布,并结合谷网宽深比及周边其他地貌证据讨论了区域冰下河存在的可能性。需要注意的是,在漫长的侵蚀改造的影响下,现今的火星表面局部坡向或许与谷网形成时期不同,故通过此方法判断水源机制需要分析大量例证的共同趋势、排除异常个例。

2.4.3 基于谷网形貌和演化的数值模拟 谷网的形貌和分布为探究火星谷网的成因提供了多样的假设,而了解这些假设背后的机制则需要物理模型的理论验证。目前已有许多研究通过气候模型或地表演化模型对谷网形成时期的早期气候进行模拟(Wordsworth *et al.*, 2015; Boatwright and Head, 2019; Kamada *et al.*, 2020; Palumbo *et al.*, 2020; Ramirez *et al.*, 2020)。例如,MARSSIM地球与行星地表演化模型能够依据对流-扩散关系对沉积物运移、地下水活动、及撞击作用等表面过程进行数值模拟,因此被大量应用于火星早期地貌的重建(Craddock *et al.*, 1997; Luo and Howard, 2008; Barnhart *et al.*, 2009; Matsubara *et al.*, 2018)。Boatwright and Head (2019)通过MARSSIM模型对火星谷网在不同水源作用下的形成情况进行了模拟,发现地下水基蚀或大气降水的单独作用不足以支持目前所见谷网地貌的形成,但二者的共同作用则能够提高侵蚀速率,从而促进大型谷网的形成。

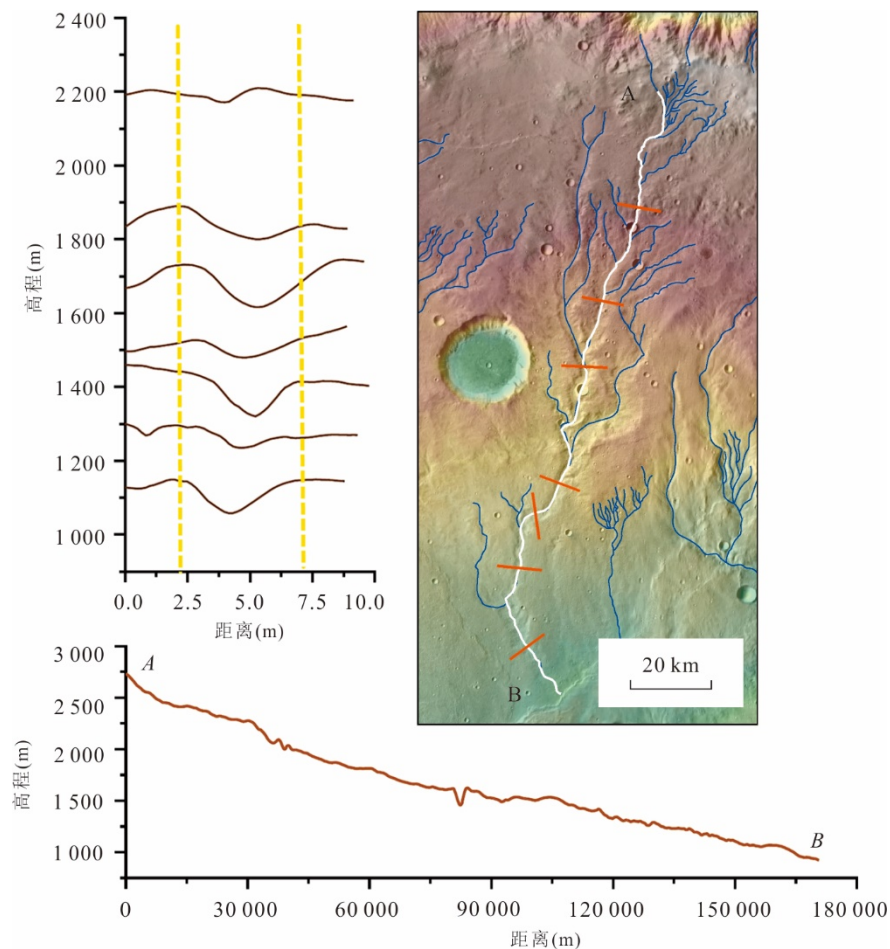


图3 火星谷网横纵剖面特征示例

Fig.3 The longitudinal and traverse profile of an example Martian valley network

所选谷网位于火星 Huygens 撞击坑南部边缘处 (19°S, 55°E)。图 a 中黄色虚线大致代表谷缘位置。图中 b 的白色实线表示图 c 中的纵剖面线,剖面始终终点分别位于 A、B 两点所示的位置。谷网影像底图为 CTX 影像叠加 MOLA 高程数据,由红色过渡至绿色代表高程降低,影像图中与谷网交切的红色短线与图 a 中的横剖面一一对应

更多的研究则通过不同的气候模型对谷网形成的气候环境进行制约。考虑到早期较弱的太阳辐射(Feulner, 2012)和浓密的二氧化碳大气(Forget *et al.*, 2013; Halevy and Head, 2014),众多气候模拟实验倾向于支持寒冷干旱的早期气候。在此情形下,火星早期大部分区域年均温低于 0 °C,降水的形式主要为降雪,而谷网形成于间歇性火山活动或撞击事件所引发的短暂暖期(Carr and Head, 2003; Halevy and Head, 2014; Palumbo and Head, 2018; Wordsworth *et al.*, 2021)。大气环流模型(GCM)是火星古气候研究中常用数值模型,能够对不同机制下的大气升温过程、地-空热传导及大尺度的大气活动进行模拟,在火星早期气候模拟中有着广泛的应用。例如,Wordsworth *et al.* (2013)通过三维大气环流模型(GCM)对火星的早

期气候、水循环及水冰演化进行了模拟,其结果支持了谷网产生于“冰冻高原(icy highland)”中短暂暖期的假说,认为季节性或昼夜性的冰雪融化足以支持谷网形成的水源需求。Palumbo and Head (2018)使用同样模型模拟了目前所见的谷网等流水地貌在假定暖湿气候下的形成情况,发现降雪而非降雨成为了主要的水源供给,而谷网分布密集的区域大多表现出年均温低于 0 °C 的特征,故干冷气候下的冰雪融水或许为谷网成因的合理解释。

2.5 火星谷网的地球类比

类比分析是比较行星学研究的重要方法,也是在目前信息有限的条件下推测火星表面所见地貌的成因、还原古环境的重要手段。目前,全世界已提出的火星类比点已有 30 余个,在各个经纬度区间内均有分布。其中,许多类比点都存在

有类似火星谷网的地貌,这些谷网类比点分布在不同的气候带、拥有不同的地质背景,为研究火星谷网的成因环境提供了多角度的例证。

关于火星谷网水源与成因的不同解释大多能在地球的不同环境下找到类比。例如,许多火星谷网具有箱状源头和短而截然的分支,被解释为具有地下水基蚀的成因。这类谷网的地球类比早在1985年即被提出:Laity and Malin(1985)对于美国科罗拉多平原(Colorado Plateau)地下水成因谷网的平面/剖面形貌、水系特征、地质背景、以及基蚀的动力学机制进行了详细的观察分析,认为同其形貌相似的火星谷网可能也具有相似的成因。Kochel and Piper(1986)对夏威夷(Hawaii)地区谷网的观察同样证明其具有地下水成因,并将其与火星谷网类比。Irwin *et al.*(2014)在阿塔卡马(Atacama)沙漠也发现了具有典型箱状沟头的谷网,并讨论了在相似情况下,火星谷网形成于干旱气候下地下水基蚀作用的可能性。Gou *et al.*(2019)将火星Evros Vallis与我国塔里木盆地开都河流域的河谷网形态与水文特征进行对比,认为二者相似的流域形态和水文参数或许指示了共有的成因,即长期的表面水流冲刷侵蚀。我国的柴达木盆地同样发育有丰富的类火星地貌(Xiao *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018; Zhao *et al.*, 2021),其中形成于干旱气候下、主要由地表径流侵蚀产生河谷网具有丰富的物质组成记录(李星波等, 2021)和类似于许多火星谷网的形貌,为谷网在干旱区季节性降雨和冰雪融水共同供给下形成的情况提供了类比(Xiao *et al.*, 2017; Xiao, 2021)。

在基蚀成因和地表径流成因之外,火星上许多疑似冰川成因的谷网同样能够在地球上找到类比。南极洲的干涸河谷因其同火星谷网相似的形态受到了广泛关注,在近期研究中常被用作火星谷网成因于干冷气候下冰川作用的证据(Marchant and Head, 2007; Heldmann *et al.*, 2013; Head and Marchant, 2014; Palumbo and Head, 2017)。例如, Heldmann *et al.*(2013)对南极麦克默多(McMurdo)干谷的水文、气候背景及形貌特征进行了详细的研究,并将其与“凤凰号”在火星极区拍摄到的表面影像对比,讨论了火星地下冰存在的可能性。Palumbo and Head(2017)通过研究麦克默多(McMurdo)干谷气温的季节变化讨论了干冷气候下短暂的气温峰值期对谷网形成的影响:对于谷不同区域的气温观测显示,一年中年均温高于0℃的时长占

比大于4%即可支持表面流水活动,并维持南极湖泊的续存,这一结果支持了火星谷网形成于干冷气候下的假说,为解释谷网成因机制提供了线索。在典型的冰蚀谷之外,近期研究中提出的冰下径流成因的火星谷网同样在加拿大德文岛(Devon Island)存在类比对象(Galofre *et al.*, 2020)。

3 火星谷网研究中的问题与争议

3.1 谷网形貌的后期改造

如今所观察到的谷网并非代表其原始形态,而是经历了长期改造和演化的结果,而后期侵蚀和改造对谷网形态的改造将干扰其形态分析。例如,广泛应用于火星谷网形貌分析的Strahler水系等级能够通过支流等级划分描述谷网分支的复杂程度(Ansan and Mangold, 2006; Galofre *et al.*, 2020),而低级的细小支流常因后期充填或沙尘覆盖在有限分辨率的影像或高程数据中难以识别,模糊了原始谷网的分支特征(Ansan *et al.*, 2008)。谷网所遭受的后期改造同样影响其成因判断。例如,沿河谷两壁的重力坡移(mass wasting)和谷壁垮塌能够加宽河谷、减小平面弯曲并增大谷壁坡度,塑造出类似地下水基蚀成因的上下游宽度近似一致、具有U型横剖面的河谷(Gulick and Baker, 1990)。后续的断层、熔岩流和沙尘覆盖会进一步改造谷网形态,为推断其原始成因增加了难度。

3.2 谷网的水源供给机制

谷网的水源分析是探明谷网成因、讨论诺亚纪古气候的重要依据。前人对火星谷网的水源供给机制已进行过较多研究,提出的补给模型包括大气降雨(Craddock and Howard, 2002; Craddock and Lorenz, 2017)、地下水的基蚀和渗流(Gulick, 2001; Luo and Howard, 2008)、冰川侵蚀(Bouquety *et al.*, 2019)、以及冰雪融水引发的地表径流或冰下河(Carr and Head, 2003; Galofre *et al.*, 2020)等。不同成因的峡谷网在形态上有所区别(图4),表1列出了这4种成因的峡谷网在汇流角、河流等级、长宽比、纵剖面起伏程度之间的区别,相对定性地总结了不同水源作用下谷网的形貌差异,而在实际判别峡谷网成因的过程中,仍需考虑更多地质地貌证据才能判定峡谷网的成因。就谷网形貌而言,类似降水成因的河道和类似地下水基蚀成因的粗短沟谷在火星上均广泛存在,同时也有部分河谷具有类似冰蚀谷的阶梯状纵剖面,而区分这些特征

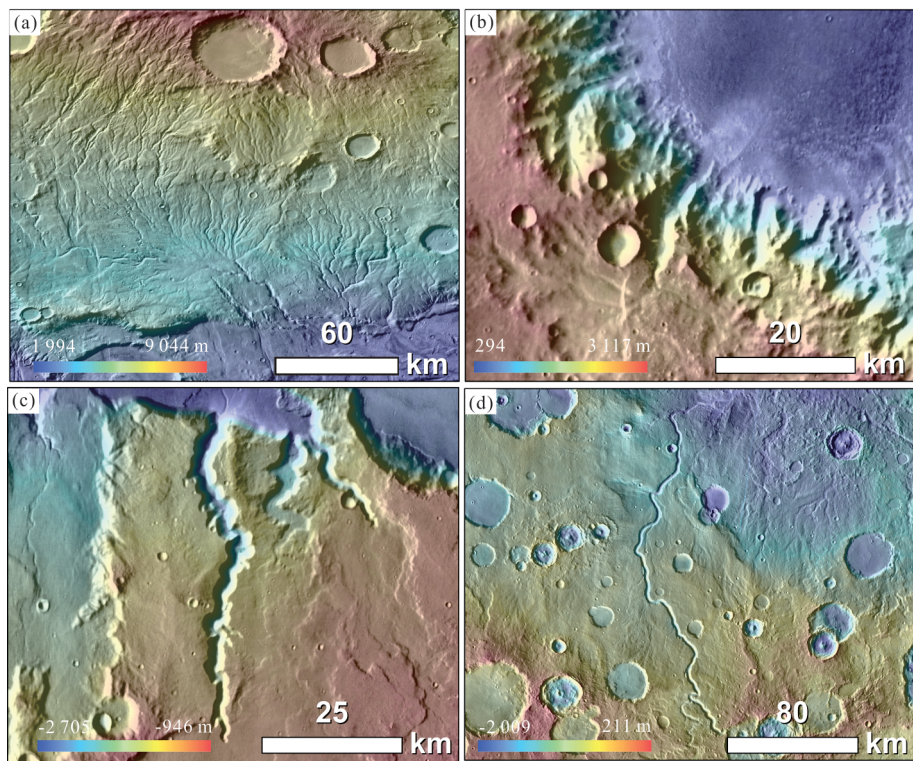


图4 具有不同水源和侵蚀特征的火星谷网

Fig.4 Martian valley networks with different types of water sources

a. 大气降水地表径流侵蚀 (92°31′46″W, 42°2′46″S); b. 冰川侵蚀 (37°7′25″E, 10°8′40″S); c. 地下水基蚀 (147°12′28″W, 5°27′30″S); d. 冰下河侵蚀 (29°1′45″E, 15°53′3″N). 背景图为 THEMIS 影像叠加 MOLA 高程数据, 由红色过渡至蓝色表示高程降低. 4 种水源分类引自 Galofre *et al.* (2020)

表 1 四种不同水源作用下典型谷网的形貌对比
Table 1 Morphological comparison of valley networks with different water sources

	地表径流 侵蚀 _{1~2}	冰川 侵蚀 ₃	地下水 侵蚀 ₄	冰下河 侵蚀 ₅
汇流角	锐角	近直角	锐角	锐角
河流等级	最大	小	小	较小
长宽比	最大	最小	小	大
纵剖面起伏程度	小	较大	最小	最大

注: 1. Craddock and Howard (2002); 2. Ramirez and Craddock (2018); 3. Bouquety *et al.* (2019); 4. Harrison and Grimm (2005); 5. Galofre *et al.* (2020).

是谷网的原始形态抑或后期改造的叠加在现有数据的支持下仍然比较困难.

目前的主流观点认同火星谷网成因于多种水源类型的共同作用,但在起主导作用的水源类型上仍存在争议.例如,Boatwright and Head(2019)通过 MARSSIM 模型模拟了单一降水、单一地下水和综合降水和地下水 3 种水源类型对谷网形貌的刻画,认为降水径流和地下水渗流的共同作用最有利于

形成现今所见的诺亚纪地表侵蚀状态;Galofre *et al.* (2020)使用主元分析法讨论地表径流、地下水基蚀、冰川侵蚀和冰下河 4 种侵蚀机制在火星谷网形成中的主导作用,指出地表径流结合冰下河侵蚀最符合大部分谷网的成因.模拟实验能够为供给机制的可行性提供证明,但对各类水源在谷网塑造中主导作用的评估仍需要更多更为明确的地质学证据.

3.3 谷网侵蚀沉积物的组成、结构和保存

火星上保存有大量早期流水侵蚀的遗迹,但河流侵蚀沉积物的保存相对较少(Fassett and Head, 2005),即使对于宽度大于 10 km 的大型树枝状谷网,其尾端也鲜有沉积扇存在(Hynek, 2016).分布在谷网尾端的扇状沉积物常被作为指示湿润气候的重要标志(图 5),但其形成过程、所需时间及水量都存在争议.早期研究大多将三角洲地貌归因于谷网的流水冲积作用(Fassett and Head, 2005; Moore and Howard, 2005),但近期关于河谷容积和谷尾沉积扇体积的对比研究表明,谷壁的重力崩塌、冰川、火山泥流或后期的风力堆积或许才是形成火星表面大部分扇状沉积的主要原因

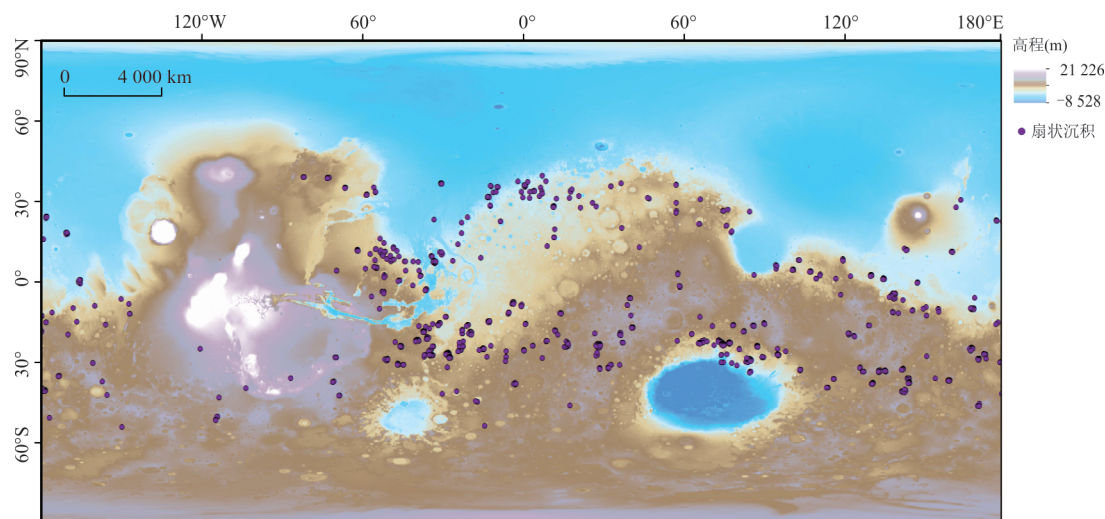


图5 火星水成扇状沉积的全球分布

Fig.5 Distribution of Martian deltas and alluvial fans

扇状沉积识别引自 Wilson *et al.*, 2021. 背景图为 MOLA 彩色地形图

(Vaz *et al.*, 2020), 同时并非所有火星扇状沉积都具有明确的气候意义. 关于扇状沉积系统形成所需的时间也存在争议, 目前研究获得的时间范围从数百至数百万年不等 (Armitage *et al.*, 2011), 故难以通过扇状沉积推断暖湿气候的存续时间或分布范围. 近期研究在火星多处三角洲和冲积扇上检测出水合二氧化硅的存在, 说明其形成过程需要大量液态水的参与 (Pan *et al.*, 2019). 然而, 对于这些侵蚀沉积物的物质组成和内部构造, 目前仍缺少全球范围的详细研究和对比. 未来高分辨率光谱和雷达数据的获取将带来更多有关谷网侵蚀沉积物成分、分布和内部结构的信息.

3.4 谷网形成的时间尺度

谷网形成时间尺度的估算对讨论早期流水活动持续时间和相对暖期的时长有着重要意义. 前人曾通过模型计算和谷网容积估算的方法推测形成谷网所需的最短时间, 但由于有限分辨率影像下谷网形貌数据提取的不确定性以及不同物理模型的差异, 不同研究者得到的时间尺度有着较大差异, 甚至相互矛盾. Barnhart *et al.* (2009) 通过火星表面形貌演化模拟得出形成火星谷网所需的流水作用时长应不少于 $10^3 \sim 10^4$ a. 相比之下, Hoke *et al.* (2011) 将谷网容积与不同的沉积物运移模型相结合, 推断出形成火星表面大型谷网所需的最短时间为 $10^5 \sim 10^7$ a; 而 Rosenberg *et al.* (2019) 在估算谷网侵蚀所需水量的基础上, 提出同一期次谷网形成的最长时间不应超过 10^4 a, 远小于 Hoke *et al.* (2011)

的计算结果. Orofino *et al.* (2018) 在估算谷网侵蚀沉积物总量的基础上对不同间断性流水活动作用下谷网的形成情况进行了模拟, 认为在持续水流的作用下, 谷网形成的时长范围应为 $5 \times 10^2 \sim 8 \times 10^6$ a, 随着流水作用间隔的增大, 谷网形成的时限也逐渐延长, 并通过谷网与撞击坑的交切关系判断其形成时限应远大于 10^4 a, 与 Rosenberg *et al.* (2019) 的结论相反. 可见, 尽管目前主流观点公认谷网形成于约 3.7 Ga 的诺亚纪-西方纪之交, 但对于这一时间节点附近谷网形成所需的具体时间长度仍存在较大争议. 一方面, 谷网的水源供给机制尚无定论, 尤其在水源为持续性或是间断性一点上尚无定论, 基于不同的水源假说所得到的谷网形成时长也存在差异; 另一方面, 在数值模拟方法之外, 现有研究往往使用谷网容积估算所需水量, 进而计算其形成时长, 而谷网容积的估算存在较大的不确定性, 谷网识别的精度和计算容积时使用的高程数据类型均会对容积估算结果产生较大影响 (Luo *et al.*, 2017).

3.5 谷网形成的气候背景

关于火星谷网形成时的气候环境在目前仍存在诸多争议, 产生了包括温暖潮湿、寒冷干燥等诸多气候假说 (Liu *et al.*, 2021). 火星表面密集的谷网、古湖泊、退化严重的撞击坑和广布的含水矿物等大量地质特征均指向持续暖湿的早期气候 (Fassett and Head, 2008; 赵健楠和肖龙, 2016; Zhao *et al.*, 2020; 赵健楠等, 2021). 不同时期侵蚀地貌的成因可由大气降水对地表侵蚀类型的转

表 2 近期研究中显示火星早期气候的证据和可能影响气候变化的机制

Table 2 Evidences of the climate of early Mars and possible climate change mechanisms from recent studies

气候证据	温暖	湿润	寒冷	干燥	升温
D/H 值		● ₁			
含水矿物		● ₂₋₃			
流水地貌	○ ₃₋₈	○ _{4-7,10}	○ _{6,10-14}	○ _{3,6,8-9,11-14}	
稀薄的光照			● ₁₅		
CO ₂ -H ₂ O 大气			● ₁₆	● ₁₆	
SO ₂	○ ₁₇				○ ₁₇
CH ₄	○ ₁₈₋₁₉				○ _{18-19,23}
H ₂	● ₁₉				● ₁₉
蛇纹石化					○ ₁₉
倾角变化					○ ₁₈
卷云					○ ₂₀₋₂₁
撞击作用					○ ₂₂
火山作用					○ ₁₇₋₁₉

注:实心点表示得到普遍认同的证据或机制,空心圆表示具有缺陷的证据或机制.1. Villanueva *et al.* (2015); 2. Bibring *et al.* (2006); 3. Ramirez and Craddock (2018); 4. Craddock and Howard (2002); 5. Ansan and Mangold (2013); 6. Craddock and Lorenz (2017); 7. Luo *et al.* (2017); 8. Ramirez *et al.* (2020); 9. Seybold *et al.* (2018); 10. Kamada *et al.* (2020); 11. Cassanelli and Head (2019); 12. Galofre *et al.* (2020); 13. Wordsworth *et al.* (2013); 14. Palumbo and Head (2018); 15. Gough (1981); 16. Kasting (1991); 17. Postawko and Kuhn (1986); 18. Kite *et al.* (2017); 19. Wordsworth *et al.* (2017); 20. Urata and Toon (2013); 21. Ramirez and Kasting (2017); 22. Steakley *et al.* (2019); 23. Zhang *et al.* (2021).

变解释:散布的雨水溅射对地表的侵蚀贯穿整个诺亚纪,导致了表面撞击坑的广泛退化;而集中于诺亚纪-西方纪交界时期的活跃流水活动和大量地表径流塑造出密集的谷网和湖泊(Kite, 2019).对现存谷网容积的最新估算显示,形成如此规模的谷网所需的水量至少为 $6.86 \times 10^{17} \text{ m}^3$,对应于覆盖火星全球约5 km深的水量(Luo *et al.*, 2017),而大范围的地表流水活动需要长期暖湿的气候.层状硅酸盐等含水矿物及氯化物在古老坑间平原上的大量分布同样为早期地表流水或地下水活动的广泛存在提供了证据(Glotch *et al.*, 2010; Carter *et al.*, 2013; 苟盛等, 2017; Ye *et al.*, 2019).根据这种假设,火星谷网形成于年均温大于 0°C 的相对暖湿气候,由降雨作为主要的水源供给.

尽管许多地质证据指向长期温暖潮湿的诺亚纪气候(Craddock and Howard, 2002; Craddock and Lorenz, 2017; Luo *et al.*, 2017),许多气候模拟实验均无法在早期微弱的太阳光照条件下重建年均温大于 0°C 的温暖诺亚纪(Wordsworth *et al.*, 2013; Palumbo and Head, 2018; Cassanelli and Head, 2019).包含GCM在内的主流气候模型大多支持长期干冷的诺亚纪早期环境,据此提出的假说认为诺亚纪的表面年均温低于冰点,降雪是唯一的降水形式,大量水赋存于高原冰川中,谷网的形成

则依赖于相对暖期中短暂的表面流水活动,或寒冷气候下的冰川侵蚀.许多谷网形貌特征同样被解释为干冷气候的产物,例如谷网中常见的箱状沟头、短而深切且向下游宽度恒定的支流(Carr, 2000; Gulick, 2001)、谷网之间较差的关联性和单支河谷的广泛分布(Alemanno *et al.*, 2018)、曲折且具有陡坎的纵剖面 and 箱型横剖面(Galofre *et al.*, 2020)、以及罕见的冲积扇(Hynek *et al.*, 2010)等.近期的一些研究尝试为早期稀薄的太阳光照所导致的寒冷气候和大范围降水活动及地表径流寻找共有的解释,通过气候模拟证实了火山活动和温室效应导致间歇性气候暖湿期的可能性(Jaumann *et al.*, 2010; Halevy and Head, 2014; Wordsworth *et al.*, 2021; 张林等, 2021); Luo *et al.* (2017)通过谷网汇流角推算了火星早期年平均降水量和地表径流量,结合对塑造谷网所需水量的估算,推断早期间歇性暖湿期的存续时长为约4.4~77 Ma.

其他关于谷网气候背景的假说包括温暖干旱的气候下周期性的雨季(Ramirez and Craddock, 2018; Seybold *et al.*, 2018)、以及凉爽潮湿的气候下降雪的季节性融化(Kamada *et al.*, 2020)等.尽管众多气候模拟结果一致否认了长期暖湿气候的可能,包括谷网形貌、矿物成分、大气性质等在内的地质学观察对气候的指示仍具有十足的多解性

(表 2). 对于同样的观测对象,使用不同分辨率的数据或不同形貌参数的组合都有可能产生不同的成因解释 (Ansan *et al.*, 2008). 未来仍需通过更多基于高分辨率影像的细节形貌和成分分析为谷网成因气候的特征与存续时间提供制约.

4 总结与展望

谷网是火星早期地质历史与环境演变的记录者. 对火星谷网的研究能够了解诺亚纪-西方纪之交的气候变化、认识火星早期水环境与宜居性提供线索. 目前关于火星谷网的全球分布、形貌特征与活动时间已有大量详细的研究,并通过与地球相似环境下谷网的类比研究讨论了谷网对火星早期水循环和气候变化的指示意义. 然而,由于谷网形成年代的久远和观测手段的有限,火星谷网研究中仍存在许多问题与争议,例如,关于谷网的水源供给机制存在大气降水、冰雪融水和地下水等多种假说,关于谷网活动的持续时间存在多期次和单期次的不同观点,而关于谷网形成的气候背景也相应的存在暖湿、干冷、或二者交替等多种假设. 在未来研究中应在高分辨率影像和光谱数据的基础上对火星谷网的形貌、年龄和矿物成分特征进行细致的研究,将观察到的地质学证据和理论模型的预测结果相协调,并结合与地球不同环境下河流形貌与成因的类比,对火星谷网的成因背景提供更为详细的制约.

References

- Alemanno, G., Orofino, V., Mancarella, F., 2018. Global Map of Martian Fluvial Systems: Age and Total Eroded Volume Estimations. *Earth and Space Science*, 5(10): 560–577. <https://doi.org/10.1029/2018ea000362>
- Anderson, R. S., Molnar, P., Kessler, M. A., 2006. Features of Glacial Valley Profiles Simply Explained. *Journal of Geophysical Research*, 111: F01004. <https://doi.org/10.1029/2005jf000344>
- Ansan, V., Mangold, N., 2006. New Observations of Warrego Valles, Mars: Evidence for Precipitation and Surface Runoff. *Planetary and Space Science*, 54(3): 219–242. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2005.12.009>
- Ansan, V., Mangold, N., 2013. 3D Morphometry of Valley Networks on Mars from HRSC/MEX DEMs: Implications for Climatic Evolution through Time. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(9): 1873–1894. <https://doi.org/10.1002/jgre.20117>
- Ansan, V., Mangold, N., Masson, P., et al., 2008. Topography of Valley Networks on Mars from Mars Express High Resolution Stereo Camera Digital Elevation Models. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E7): E07006. <https://doi.org/10.1029/2007je002986>
- Armitage, J. J., Warner, N. H., Goddard, K., et al., 2011. Timescales of Alluvial Fan Development by Precipitation on Mars. *Geophysical Research Letters*, 38(17): L17203. <https://doi.org/10.1029/2011gl048907>
- Bahia, R. S., Covey-Crump, S., Jones, M. A., et al., 2022. Discordance Analysis on a High-Resolution Valley Network Map of Mars: Assessing the Effects of Scale on the Conformity of Valley Orientation and Surface Slope Direction. *Icarus*, 383: 115041. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2022.115041>
- Baker, V. R., Strom, R. G., Gulick, V. C., et al., 1991. Ancient Oceans, Ice Sheets and the Hydrological Cycle on Mars. *Nature*, 352(6336): 589–594. <https://doi.org/10.1038/352589a0>
- Barnhart, C. J., Howard, A. D., Moore, J. M., 2009. Long-Term Precipitation and Late-Stage Valley Network Formation: Landform Simulations of Parana Basin, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114(E1): E01003. <https://doi.org/10.1029/2008je003122>
- Bibring, J. P., Langevin, Y., Mustard, J. F., et al., 2006. Global Mineralogical and Aqueous Mars History Derived from OMEGA/Mars Express Data. *Science*, 312(5772): 400–404. <https://doi.org/10.1126/science.1122659>
- Bibring, J. P., Langevin, Y., Poulet, F., et al., 2004. Perennial Water Ice Identified in the South Polar Cap of Mars. *Nature*, 428(6983): 627–630. <https://doi.org/10.1038/nature02461>
- Boatwright, B. D., Head, J. W., 2019. Simulating Early Mars Hydrology with the MARSSIM Landform Evolution Model: New Insights from an Integrated System of Precipitation, Infiltration, and Groundwater Flow. *Planetary and Space Science*, 171: 17–33. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2019.04.001>
- Bouquety, A., Sejourne, A., Costard, F., et al., 2019. Morphometric Evidence of 3.6 Ga Glacial Valleys and Glacial Cirques in Martian Highlands: South of Terra Sabaea. *Geomorphology*, 334: 91–111. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.022>
- Byrne, S., 2009. The Polar Deposits of Mars. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 37: 535–560. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.031208.100101>

- Carr, M. H., 1974. Tectonism and Volcanism of the Tharsis Region of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 79(26): 3943–3949. <https://doi.org/10.1029/jb079i026p03943>
- Carr, M. H., 1995. The Martian Drainage System and the Origin of Valley Networks and Fretted Channels. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 100(E4): 7479–7507. <https://doi.org/10.1029/95je00260>
- Carr, M. H., 2012. The Fluvial History of Mars. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1966): 2193–2215. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0500>
- Carr, M. H., Chuang, F. C., 1997. Martian Drainage Densities. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E4): 9145–9152. <https://doi.org/10.1029/97je00113>
- Carr, M. H., Head, J. W., 2003. Basal Melting of Snow on Early Mars: A Possible Origin of Some Valley Networks. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 2245. <https://doi.org/10.1029/2003gl018575>
- Carr, M. H., Malin, M. C., 2000. Meter-Scale Characteristics of Martian Channels and Valleys. *Icarus*, 146(2): 366–386. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6428>
- Carter, J., Poulet, F., Bibring, J. P., et al., 2013. Hydrous Minerals on Mars as Seen by the CRISM and OMEGA Imaging Spectrometers: Updated Global View. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(4): 831–858. <https://doi.org/10.1029/2012je004145>
- Cassanelli, J. P., Head, J. W., 2019. Assessing the Formation of Valley Networks on a Cold Early Mars: Predictions for Erosion Rates and Channel Morphology. *Icarus*, 321: 216–231. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.11.020>
- Chan, N. H., Perron, J. T., Mitrovica, J. X., et al., 2018. New Evidence of an Ancient Martian Ocean from the Global Distribution of Valley Networks. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(8): 2138–2150. <https://doi.org/10.1029/2018je005536>
- Clifford, S. M., 1993. A Model for the Hydrologic and Climatic Behavior of Water on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E6): 10973–11016. <https://doi.org/10.1029/93je00225>
- Craddock, R. A., Howard, A. D., 2002. The Case for Rainfall on a Warm, Wet Early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107(E11): 5111. <https://doi.org/10.1029/2001je001505>
- Craddock, R. A., Lorenz, R. D., 2017. The Changing Nature of Rainfall during the Early History of Mars. *Icarus*, 293: 172–179. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2017.04.013>
- Craddock, R. A., Maxwell, T. A., Howard, A. D., 1997. Crater Morphometry and Modification in the Sinus Sabaeus and Margaritifer Sinus Regions of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 102(E6): 13321–13340. <https://doi.org/10.1029/97je01084>
- Di Achille, G., Hynek, B. M., 2010. Ancient Ocean on Mars Supported by Global Distribution of Deltas and Valleys. *Nature Geoscience*, 3(7): 459–463. <https://doi.org/10.1038/ngeo891>
- Dundas, C.M., Bramson, A.M., Ojha, L., et al., 2018. Exposed Subsurface Ice Sheets in the Martian Mid-Latitudes. *Science*, 359(6372): 199–201. <https://doi.org/10.1126/science.aao1619>
- Fassett, C. I., Head, J. W., 2005. Fluvial Sedimentary Deposits on Mars: Ancient Deltas in a Crater Lake in the Nili Fossae Region. *Geophysical Research Letters*, 32(14): L14201. <https://doi.org/10.1029/2005gl023456>
- Fassett, C. I., Head, J. W., 2008. The Timing of Martian Valley Network Activity: Constraints from Buffered Crater Counting. *Icarus*, 195(1): 61–89. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.12.009>
- Feulner, G., 2012. The Faint Young Sun Problem. *Reviews of Geophysics*, 50(2): RG2006. <https://doi.org/10.1029/2011rg000375>
- Forget, F., Wordsworth, R., Millour, E., et al., 2013. 3D Modelling of the Early Martian Climate under a Denser CO₂ Atmosphere: Temperatures and CO₂ Ice Clouds. *Icarus*, 222(1): 81–99. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.10.019>
- Galofre, A. G., Jellinek, A.M., 2017a. Global Catalogue of the Martian Valley Networks: Evidences for Fluvial, Sapping and Subglacial Processes on Early Mars. In: Fourth International Conference on Early Mars: Geologic, Hydrologic, and Climatic Evolution and the Implications for Life. Lunar and Planetary Institute, Flagstaff.
- Galofre, A.G., Jellinek, A. M., 2017b. The Geometry and Complexity of Spatial Patterns of Terrestrial Channel Networks: Distinctive Fingerprints of Erosional Regimes. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122(4): 1037–1059. <https://doi.org/10.1002/2016jf003825>
- Galofre, A.G., Jellinek, A. M., Osinski, G. R., 2020. Valley Formation on Early Mars by Subglacial and Fluvial Erosion. *Nature Geoscience*, 13(10): 663–668. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0618-x>
- Glotch, T. D., Bandfield, J. L., Tornabene, L. L., et al., 2010. Distribution and Formation of Chlorides and Phyl-

- losilicates in Terra Sirenum, Mars. *Geophysical Research Letters*, 37(16): L16202. <https://doi.org/10.1029/2010gl044557>
- Goldspiel, J. M., Squyres, S. W., 2000. Groundwater Sapping and Valley Formation on Mars. *Icarus*, 148(1): 176—192. <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6465>
- Gou, S., Yue, Z. Y., Di, K. C., et al., 2017. Advances in Aqueous Minerals Detection on Martian Surface. *Journal of Remote Sensing*, 21(4): 531—548 (in Chinese with English abstract).
- Gou, S., Yue, Z. Y., Di, K. C., et al., 2019. Comparative Study between Rivers in Tarim Basin in Northwest China and Evros Vallis on Mars. *Icarus*, 328: 127—140. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.03.017>
- Gough, D. O., 1981. Solar Interior Structure and Luminosity Variations. *Physics of Solar Variations*. Dordrecht: Springer, Netherlands, 21—34. https://doi.org/10.1007/978-94-010-9633-1_4
- Gulick, V. C., 2001. Origin of the Valley Networks on Mars: A Hydrological Perspective. *Geomorphology*, 37(3—4): 241—268. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(00\)00086-6](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(00)00086-6)
- Gulick, V. C., Baker, V. R., 1990. Origin and Evolution of Valleys on Martian Volcanoes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95(B9): 14325—14344. <https://doi.org/10.1029/jb095ib09p14325>
- Halevy, I., Head, J. W., 2014. Episodic Warming of Early Mars by Punctuated volcanism. *Nature Geoscience*, 7(12): 865—868. <https://doi.org/10.1038/ngeo2293>
- Harrison, K. P., Grimm, R. E., 2005. Groundwater-Controlled Valley Networks and the Decline of Surface Runoff on Early Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E12): E12S16. <https://doi.org/10.1029/2005je002455>
- Head, J. W., Marchant, D. R., 2014. The Climate History of Early Mars: Insights from the Antarctic McMurdo Dry Valleys Hydrologic System. *Antarctic Science*, 26(6): 774—800. <https://doi.org/10.1017/s0954102014000686>
- Heldmann, J. L., Pollard, W., McKay, C. P., et al., 2013. The High Elevation Dry Valleys in Antarctica as Analog Sites for Subsurface Ice on Mars. *Planetary and Space Science*, 85: 53—58. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.05.019>
- Hoke, M. R. T., Hynek, B. M., Tucker, G. E., 2011. Formation Timescales of Large Martian Valley Networks. *Earth and Planetary Science Letters*, 312(1—2): 1—12. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2011.09.053>
- Holt, J. W., Safaeinili, A., Plaut, J. J., et al., 2008. Radar Sounding Evidence for Buried Glaciers in the Southern Mid-Latitudes of Mars. *Science*, 322(5905): 1235—1238. <https://doi.org/10.1126/science.1164246>
- Hynek, B., 2016. Research Focus: The Great Climate Paradox of Ancient Mars. *Geology*, 44(10): 879—880. <https://doi.org/10.1130/focus102016.1>
- Hynek, B. M., Beach, M., 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. <https://doi.org/10.1029/2009je003548>
- Irwin, R. P., Tooth, S., Craddock, R. A., et al., 2014. Origin and Development of Theater-Headed Valleys in the Atacama Desert, Northern Chile: Morphological Analogs to Martian Valley Networks. *Icarus*, 243: 296—310. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.08.012>
- Jaumann, R., Nass, A., Tirsch, D., et al., 2010. The Western Libya Montes Valley System on Mars: Evidence for Episodic and Multi-Genetic Erosion Events during the Martian History. *Earth and Planetary Science Letters*, 294(3—4): 272—290. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.09.026>
- Kamada, A., Kuroda, T., Kasaba, Y., et al., 2020. A Coupled Atmosphere-Hydrosphere Global Climate Model of Early Mars: A “Cool and Wet” Scenario for the Formation of Water Channels. *Icarus*, 338: 113567. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.113567>
- Kasting, J. F., 1991. CO₂ Condensation and the Climate of Early Mars. *Icarus*, 94(1): 1—13. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90137-I](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90137-I)
- Kasting, J. F., 1997. Warming Early Earth and Mars. *Science*, 276(5316): 1213. <https://doi.org/10.1126/science.276.5316.1213>
- Kite, E. S., 2019. Geologic Constraints on Early Mars Climate. *Space Science Reviews*, 215(1): 1—47. <https://doi.org/10.1007/s11214-018-0575-5>
- Kite, E. S., Gao, P., Goldblatt, C., et al., 2017. Methane Bursts as a Trigger for Intermittent Lake-Forming Climates on Post-Noachian Mars. *Nature Geoscience*, 10(10): 737—740. <https://doi.org/10.1038/ngeo3033>
- Kochel, R., Piper, J. F., 1986. Morphology of Large Valleys on Hawaii—Evidence for Groundwater Sapping and Comparisons with Martian Valleys. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B13): E175—E192.
- Laity, J. E., Malin, M. C., 1985. Sapping Processes and the Development of Theater-Headed Valley Networks on the Colorado Plateau. *Geological Society of America*

- Bulletin*, 96(2): 203–217. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1985\)96203:spatdo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1985)96203:spatdo>2.0.co;2)
- Lapotre, M. G. A., Lamb, M. P., 2018. Substrate Controls on Valley Formation by Groundwater on Earth and Mars. *Geology*, 46(6): 531–534. <https://doi.org/10.1130/g40007.1>
- Li, X.B., Ji, J.L., Cao, Z.M., et al., 2021. The Climatic Significance of the Color of the Paleo-Neogene Fluvial and Lacustrine Sediments in the Northern Qaidam Basin. *Earth Science*, 46(9): 3278–3289 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Liu, Z.H., Wu, X., et al., 2021. Evolution of Water Environment on Mars. *Acta Geologica Sinica*, 95(9): 2725–2741 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y., Wu, X., Liu, Z.H., et al., 2021. Geological Evolution and Habitable Environment of Mars: Progress and Prospects. *Reviews of Geophysics and Planetary Physics*, 52(4): 416–436. <https://doi.org/10.19975/j.dqyxx.2021-025>
- Lucchitta, B.K., 1980. Martian Outflow Channels Sculptured by Glaciers II. In: Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, Houston, 634–636.
- Lucchitta, B. K., 1983. Permafrost on Mars: Polygonally Fractured Ground. In: Permafrost: 4th International Conference Proceedings. National Academy Press, Washington, D.C., 744–749.
- Luo, W., Cang, X. Z., Howard, A. D., 2017. New Martian Valley Network Volume Estimate Consistent with Ancient Ocean and Warm and Wet Climate. *Nature Communications*, 8: 15766. <https://doi.org/10.1038/ncomms15766>
- Luo, W., Howard, A. D., 2008. Computer Simulation of the Role of Groundwater Seepage in Forming Martian Valley Networks. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E5): E05002. <https://doi.org/10.1029/2007je002981>
- Luo, W., Stepinski, T. F., 2009. Computer - Generated Global Map of Valley Networks on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 114(E11): E11010. <https://doi.org/10.1029/2009je003357>
- Marchant, D. R., Head, J. W., 2007. Antarctic Dry Valleys: Microclimate Zonation, Variable Geomorphic Processes, and Implications for Assessing Climate Change on Mars. *Icarus*, 192(1): 187–222. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2007.06.018>
- Matsubara, Y., Howard, A. D., Irwin, R. P., 2018. Constraints on the Noachian Paleoclimate of the Martian Highlands from Landscape Evolution Modeling. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(11): 2958–2979. <https://doi.org/10.1029/2018je005572>
- McEwen, A. S., Ojha, L., Dundas, C. M., et al., 2011. Seasonal Flows on Warm Martian Slopes. *Science*, 333(6043): 740–743. <https://doi.org/10.1126/science.1204816>
- McKay, C. P., Davis, W. L., 1991. Duration of Liquid Water Habitats on Early Mars. *Icarus*, 90(2): 214–221. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(91\)90102-Y](https://doi.org/10.1016/0019-1035(91)90102-Y)
- Mellon, M. T., Feldman, W. C., Prettyman, T. H., 2004. The Presence and Stability of Ground Ice in the Southern Hemisphere of Mars. *Icarus*, 169(2): 324–340. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2003.10.022>
- Moore, J. M., Howard, A. D., 2005. Large Alluvial Fans on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E4): E04005. <https://doi.org/10.1029/2004je002352>
- Orofino, V., Alemanno, G., Di Achille, G., et al., 2018. Estimate of the Water Flow Duration in Large Martian Fluvial Systems. *Planetary and Space Science*, 163: 83–96. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2018.06.001>
- Palumbo, A.M., Head, J.W., 2017. An Analysis of Seasonal Temperature Variation in the Antarctic McMurdo Dry Valleys: Implications for Early Martian Climate and Valley Network Formation. In: Lunar and Planetary Science Conference. Lunar and Planetary Institute, The Woodlands, 2192.
- Palumbo, A. M., Head, J. W., 2018. Early Mars Climate History: Characterizing a “Warm and Wet” Martian Climate with a 3-D Global Climate Model and Testing Geological Predictions. *Geophysical Research Letters*, 45(19): 10249–10258. <https://doi.org/10.1029/2018gl079767>
- Palumbo, A. M., Head, J. W., Wilson, L., 2020. Rainfall on Noachian Mars: Nature, Timing, and Influence on Geologic Processes and Climate History. *Icarus*, 347: 113782. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2020.113782>
- Pan, L., Carter, J., Quantin-Nataf, C., 2019. Hydrated Silica in Martian Alluvial Fans and Deltas. In: Ninth International Conference on Mars. The California Institute of Technology, Pasadena, 6239.
- Postawko, S. E., Kuhn, W. R., 1986. Effect of the Greenhouse Gases (CO₂, H₂O, SO₂) on Martian Paleoclimate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91(B4): 431–438. <https://doi.org/10.1029/jb091ib04p0d431>
- Ramirez, R. M., Craddock, R. A., 2018. The Geological and Climatological Case for a Warmer and Wetter Early Mars. *Nature Geoscience*, 11(4): 230–237. <https://doi.org/10.1038/ngeo2588>

- org/10.1038/s41561-018-0093-9
- Ramirez, R. M., Craddock, R. A., Usui, T., 2020. Climate Simulations of Early Mars with Estimated Precipitation, Runoff, and Erosion Rates. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(3): e2019JE006160. <https://doi.org/10.1029/2019je006160>
- Ramirez, R. M., Kasting, J. F., 2017. Could Cirrus Clouds Have Warmed Early Mars? *Icarus*, 281: 248–261. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2016.08.016>
- Rosenberg, E. N., Palumbo, A. M., Cassanelli, J. P., et al., 2019. The Volume of Water Required to Carve the Martian Valley Networks: Improved Constraints Using Updated Methods. *Icarus*, 317: 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.07.017>
- Sagan, C., Toon, O. B., Gierasch, P. J., 1973. Climatic Change on Mars. *Science*, 181(4104): 1045–1049. <https://doi.org/10.1126/science.181.4104.1045>
- Schaefer, E. I., McEwen, A. S., Sutton, S. S., 2019. A Case Study of Recurring Slope Lineae (RSL) at Tivat Crater: Implications for RSL Origins. *Icarus*, 317: 621–648. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2018.07.014>
- Schumm, S. A., 1974. Structural Origin of Large Martian Channels. *Icarus*, 22(3): 371–384. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(74\)90184-5](https://doi.org/10.1016/0019-1035(74)90184-5)
- Seybold, H. J., Kite, E., Kirchner, J. W., 2018. Branching Geometry of Valley Networks on Mars and Earth and Its Implications for Early Martian Climate. *Science Advances*, 4(6): eaar6692. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aar6692>
- Shi, Y. T., Zhao, J. N., Xiao, L., et al., 2022. An Arid-Semiarid Climate during the Noachian-Hesperian Transition in the Huygens Region, Mars: Evidence from Morphological Studies of Valley Networks. *Icarus*, 373: 114789. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2021.114789>
- Steakley, K., Murphy, J., Kahre, M., et al., 2019. Testing the Impact Heating Hypothesis for Early Mars with a 3-D Global Climate Model. *Icarus*, 330: 169–188. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2019.04.005>
- Strahler, A. N., 1957. Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6): 913–920.
- Tanaka, K. L., Jr Skinner, J. A., Dohm, J. M., et al., 2014. Geologic Map of Mars. U.S. Geol. Surv. Sci. Invest., 3292.
- Toon, O. B., Pollack, J. B., Ward, W., et al., 1980. The Astronomical Theory of Climatic Change on Mars. *Icarus*, 44(3): 552–607. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(80\)90130-X](https://doi.org/10.1016/0019-1035(80)90130-X)
- Urata, R. A., Toon, O. B., 2013. Simulations of the Martian Hydrologic Cycle with a General Circulation Model: Implications for the Ancient Martian Climate. *Icarus*, 226(1): 229–250. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2013.05.014>
- Vaz, D. A., Di Achille, G., Hynek, B. M., et al., 2020. Martian Fan Deposits: Insights on Depositional Processes and Origin from Mass Balance Survey. *Earth and Planetary Science Letters*, 533: 116049. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2019.116049>
- Villanueva, G., Villanueva, G., Mumma, M., et al., 2015. Strong Water Isotopic Anomalies in the Martian Atmosphere: Probing Current and Ancient Reservoirs. *Science*, 348(6231): 218–221.
- Wang, J. A., Xiao, L., Reiss, D., et al., 2018. Geological Features and Evolution of Yardangs in the Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China): A Terrestrial Analogue for Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 123(9): 2336–2364. <https://doi.org/10.1029/2018je005719>
- Williams, R. M. E., Phillips, R. J., 2001. Morphometric Measurements of Martian Valley Networks from Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) Data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10): 23737–23751. <https://doi.org/10.1029/2000je001409>
- Wilson, S. A., Morgan, A. M., Howard, A. D., et al., 2021. The Global Distribution of Craters with Alluvial Fans and Deltas on Mars. *Geophysical Research Letters*, 48(4): e2020GL091653.
- Wordsworth, R. D., Forget, F., Millour, E., et al., 2013. Global Modelling of the Early Martian Climate under a Denser CO₂ Atmosphere: Water Cycle and Ice Evolution. *Icarus*, 222(1): 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2012.09.036>
- Wordsworth, R. D., Kalugina, Y., Lokshtanov, S., et al., 2017. Transient Reducing Greenhouse Warming on Early Mars. *Geophysical Research Letters*, 44(2): 665–671. <https://doi.org/10.1002/2016gl071766>
- Wordsworth, R. D., Kerber, L., Pierrehumbert, R. T., et al., 2015. Comparison of “Warm and Wet” and “Cold and Icy” Scenarios for Early Mars in a 3-D Climate Model. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 120(6): 1201–1219. <https://doi.org/10.1002/2015je004787>
- Wordsworth, R. D., Knoll, A. H., Hurowitz, J., et al., 2021. A Coupled Model of Episodic Warming, Oxidation and Geochemical Transitions on Early Mars. *Nature Geoscience*, 14(3): 127–132. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00701-8>

- Xiao, L., 2021. Mars on Earth: A Study of the Qaidam Basin. World Scientific Publishing House, Singapore.
- Xiao, L., Wang, J., Dang, Y. N., et al., 2017. A New Terrestrial Analogue Site for Mars Research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 164: 84–101. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2016.11.003>
- Ye, B. L., Huang, J., Michalski, J., et al., 2019. Geomorphologic Characteristics of Polygonal Features on Chloride-Bearing Deposits on Mars: Implications for Martian Hydrology and Astrobiology. *Journal of Earth Science*, 30(5): 1049–1058. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1212-2>
- Zhang, L., Jin, M.G., Liu, Y.F., et al., 2021. Concentration Variation Characteristics of Atmospheric Greenhouse Gases at Waliguan and Shangdianzi in China. *Earth Science*, 46(8): 2984–2998 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J.N., Shi, Y.T., Zhang, M.J., et al., 2021. Advances in Martian Water-Related Landforms. *Acta Geologica Sinica*, 95(9): 2755–2768 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. N., Wang, J., Zhang, M. J., et al., 2021. Unique Curvilinear Ridges in the Qaidam Basin, NW China: Implications for Martian Fluvial Ridges. *Geomorphology*, 372: 107472. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107472>
- Zhao, J.N., Xiao, L., 2016. Achievements, Issues and Prospects in Study of Martian Paleolakes. *Earth Science*, 41(9): 1572–1582 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, J. N., Xiao, L., Glotch, T. D., 2020. Paleolakes in the Northwest Hellas Region, Mars: Implications for the Regional Geologic History and Paleoclimate. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(3): e2019JE006196. <https://doi.org/10.1029/2019je006196>

中文参考文献

- 苟盛, 岳宗玉, 邸凯昌, 等, 2017. 火星表面含水矿物探测进展. 遥感学报, 21(4): 531–548.
- 李星波, 季军良, 曹展铭, 等, 2021. 柴达木盆地北缘古-新近纪河湖相沉积物颜色的气候意义. 地球科学, 46(9): 3278–3289.
- 刘洋, 刘正豪, 吴兴, 等, 2021. 火星的水环境演化. 地质学报, 95(9): 2725–2741.
- 张林, 靳孟贵, 刘延锋, 等, 2021. 中国瓦里关和上甸子大气温室气体浓度变化特征. 地球科学, 46(8): 2984–2998.
- 赵健楠, 史语桐, 张明杰, 等, 2021. 火星水成地貌研究进展. 地质学报, 95(9): 2755–2768.
- 赵健楠, 肖龙, 2016. 火星古湖泊研究的现状、问题与展望. 地球科学, 41(9): 1572–1582.