

柴达木盆地红崖中国“火星村”选址区与火星的类比研究

包刚^{1,2}, 曲帅屹^{1,2}, 傅泽华³, 张西营⁴, 李斌凯⁴, 唐启亮⁴, 余冬梅⁴, 李雯霞⁴,
李永寿⁴, 王建萍⁴, 马海州⁴, 李雄耀^{1,5}, 赵宇鵒^{1,5*}

1. 中国科学院 地球化学研究所, 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 澳门科技大学, 澳门 999078; 4. 中国科学院 青海盐湖研究所, 青海省盐湖地质与环境重点实验室, 西宁 810018;
5. 中国科学院 比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026

摘要: 柴达木盆地是我国境内首个火星类比区。其中, 大柴旦红崖地区被选为中国“火星村”的建设地点。本研究从红崖地区的地质构造背景、气候环境、地形地貌、矿物岩石类型等方面开展了与火星的类比研究。研究表明, 红崖地区位于柴达木盆地, 其气候环境与干燥寒冷的现代火星类似。红崖核心区及周边具有多类型火星地貌, 包括沙丘、河谷、树枝状结构、黑影区域、多边形结构和雅丹地貌等。红崖地区的岩石和土壤中存在多类火星矿物, 包括石英、碳酸盐、石膏、石盐、斜长石、碱性长石和绿泥石等。红崖地区可为未来火星探测器和载荷的地面验证试验及相关的科普科教活动等提供天然实验场地。

关键词: 柴达木盆地; 红崖; 火星村; 火星类比区; 火星

中图分类号: P691 文章编号: 1007-2802(2022)02-0348-13 doi:10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.096

An Analogical Study on the Mars and “Mars Village” Construction Site at the Red Cliff in the Qaidam Basin, China

BAO Gang^{1,2}, QU Shuai-yi^{1,2}, FU Ze-hua³, ZHANG Xi-ying⁴, LI Bin-kai⁴, TANG Qi-liang⁴, YU Dong-mei⁴,
LI Wen-xia⁴, LI Yong-shou⁴, WANG Jian-ping⁴, MA Hai-zhou⁴, LI Xiong-yao^{1,5}, ZHAO Yu-Yan^{1,5*}

1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550081, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China; 4. Qinghai Provincial Key Laboratory of Geology and Environment of Salt Lake, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China; 5. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230026, China

Abstract: The Qaidam basin is the first Mars analog area within China. The Red Cliff in the Qaidam basin has been selected to construct the China's “Mars Village”. In this study, we have conducted an analogical study on the Red Cliff and Mars in aspects of geological and structural backgrounds, climate and environment, topography and landscape, types of minerals and rocks, and so on. It is shown that climate and environment of the Red Cliff in the Qaidam basin are similar to those of the dry and cold Mars. In the core zone and surrounding areas of the Red Cliff, there are many types of analog Martian landforms, including dunes, valleys, dendritic structures, streaks, polygonal structures, and the Yardang landform. Minerals, such as quartz, carbonates, gypsum, halite, plagioclase, alkaline feldspar, and chlorite, detected in the rock and soil samples of the Red Cliff, have also been found on the Mars. Thus, the Red Cliff can be recognized as a natural lab for the ground surface verification test of the Mars detectors and payloads as well as for related popularization and

收稿编号: 2020-079, 2020-6-28 收到, 2020-8-19 改回

基金项目: 青海省科技计划创新平台建设专项(2018-ZJ-T10); 国家自然科学基金资助项目(41673072); 中国科学院“西部青年学者”项目

第一作者简介: 包刚(1994-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: baogang@mail.gyig.ac.cn.

* 通信作者简介: 赵宇鵒(1981-), 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 火星地质环境演化和比较行星学. E-mail: zhaoyuyan@mail.gyig.ac.cn.

education activities of science.

Key words: Qaidam basin; Red Cliff; Mars Village; Mars analog area; Mars

0 引言

随着中国首次火星探测任务(天问一号)的立项,我国对火星的关注和研究方兴未艾(Ye et al., 2017)。在火星科学的研究方法上,除了遥感探测、就位探测、火星陨石研究和实验/数值模拟外,还有火星类比区研究方法,这是通过寻找和研究地球上的类火星环境,理解发生在火星上的地质过程和可能的生物过程。火星类比区可为寻找火星生命、优化探测载荷设计和探测策略,测试科学仪器和宇航服等提供支持。目前,国际上已经建立的火星类比区有 50 多个,包括阿塔卡玛沙漠、南极干谷、澳大利亚中部、美国西部沙漠、北非等(Baldrige et al., 2004; Cabrol et al., 2007; Essefi et al., 2014)。我国境内的火星类比区的建立和研究尚处于起步阶段。近年来,围绕柴达木盆地开展了类火星地形地貌、类火星矿物、天体生物学等相关研究(Angles and Li, 2017; Wang et al., 2018b; Xiao et al., 2017)。

柴达木盆地的大柴旦红崖地区(图 1)将建设以“科学+科幻+自然+生态+文化”为核心理念的“中国火星村”,这将是首个模拟火星基地。由于红崖地区研究程度低,相关基础资料匮乏,严重制约了各方面工作的开展。本研究详细调研了红崖地区的地质构造背景,并从气候环境、地形地貌、矿物岩石类型等方面开展了与火星相似性的类比研究。本研究获取的各类基础数据还将用于“中国火星模拟基地选址区综合信息数据平台”的构建,最终为中国火星村的选址、建设、区域文化旅游资源开发利用提供基础科学数据。

1 选址区地质概况

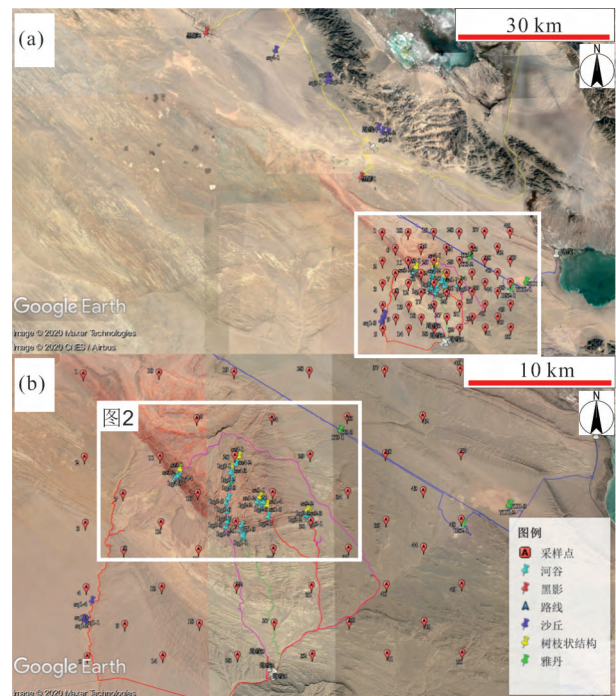
柴达木盆地位于青藏高原东北部,面积约 12 万 km^2 ,平均海拔约 2800 m,是青藏高原最大的沉积盆地。整个盆地被东北部的祁连造山带,西北部的阿尔金断层带和西南部的东昆仑-齐曼塔尔造山带所包围(Xiao et al., 2017)。柴达木盆地基底由前寒武纪-志留纪变质岩组成,上覆泥盆纪-新生代的沉积地层。磁性地层学研究表明,最年轻的沉积物在花土沟地区,约为 11 Ma(Chang et al., 2015)。盆地内新生代沉积物厚度超过 1 万 m,主要由盐湖-高盐湖相泥岩和粉砂岩组成,盆地边缘还有一些河流砂岩和砾岩(Rieser et al., 2005)。由于青藏高原东

南部的喜马拉雅山脉阻挡了印度季风,柴达木盆地因此成为地球上最干旱的地区之一(Wang et al., 2018)。按国际气候分类柴达木盆地属于超干旱地区(Kong et al., 2018),主要地貌为荒漠,植被覆盖率很少,表面分布着大量的河流、湖泊干涸后的沉积物,主要为氯化物和硫酸盐等蒸发盐。独特的地理和环境条件使其形成了多种可类比现代火星的地貌类型,例如沙丘和雅丹等。

2 研究方法

在前人研究的基础上,对大柴旦红崖及周边地区进行了野外踏勘并对类火星地貌类型进行了调查,测量了相关参数(高度、坡度等),并与火星遥感影像进行了形貌对比。野外工作区域和路线如图 1 所示。根据地质规范网度控制,在不同的区域采集土壤(采样深度 20~40 cm)和岩石样品,用于与火星表面矿物数据的对比。

岩石及土壤 XRD 物相分析:取少量样品(约 3~



(a) 总体线路图;(b) 图 a 中白色区域放大图。曲线(黄色、红色、粉色、蓝色)代表不同的考察路线;图钉代表拍照地点(紫色点为沙丘,蓝色点为河谷,黄色点为树枝状结构,红色点为黑影区域,绿色点为其他);红色打点代表采样点。图片来自谷歌地图

图 1 野外线路和采样点示意图

Fig. 1 The schematic map showing routes of the field trip and sampling sites

5 g),烘干,在玛瑙研钵中研磨至 200 目,按照化学分析四分法进行分样。利用 X'Pert PRO 型粉晶 X 射线衍射仪(XRD)对矿物种类及含量进行测定。电压为 40 kV,电流为 30 mA,铜靶 Ka 辐射($\lambda = 1.5406$),扫描角度(2θ)为 $5^\circ \sim 80^\circ$,扫描速度为 $5^\circ/\text{min}$ 。矿物相的相对百分含量分析由仪器自带的软件 X'Pert Highscore Plus 完成。

岩石及土壤元素分析:样品放入耐氢氟酸的雾化器及炬管内进行溶解。分析方法及检测精度如下: Cl^- 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 采用容量法,相对标准偏差 $\text{RSD} \leq 0.5\%$;其余离子利用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-AES)进行分析。ICP-AES 的检测限为 $\text{S}(\text{SO}_4)$ 及 Na 、 Si 低于 0.1 mg/L ; K 、 Ca 、 Mg 、 B 、 Li 、 Sr 小于和等于 0.05 mg/L 。以上实验操作和分析过程均在中国科学院青海盐湖研究所的盐湖地质与环境实验室中完成。

3 结果与讨论

3.1 气候环境和地质背景

柴达木盆地是世界上海拔最高的盆地,地势由西北向东南微倾,海拔 $2800 \sim 3200 \text{ m}$,气压低,紫外线辐射高(张继民, 2006)。气候极度干旱,年平均降水量为 $60 \sim 80 \text{ mm}$,年蒸发量为 1800 mm (何先虎, 2014)。季节性和昼夜温差大,年平均温度为 3.5°C 。目前火星表面类似于高干旱的沙漠,全年干燥和寒冷,平均地表温度比地球低约 70 K (Ramirez and Craddock, 2018)。在气候环境上,柴达木与现代火星十分相似。

大柴旦红崖地区(图 2)主要出露下白垩统犬牙沟组、古-始新统路乐河组、渐新统干柴沟组地层。

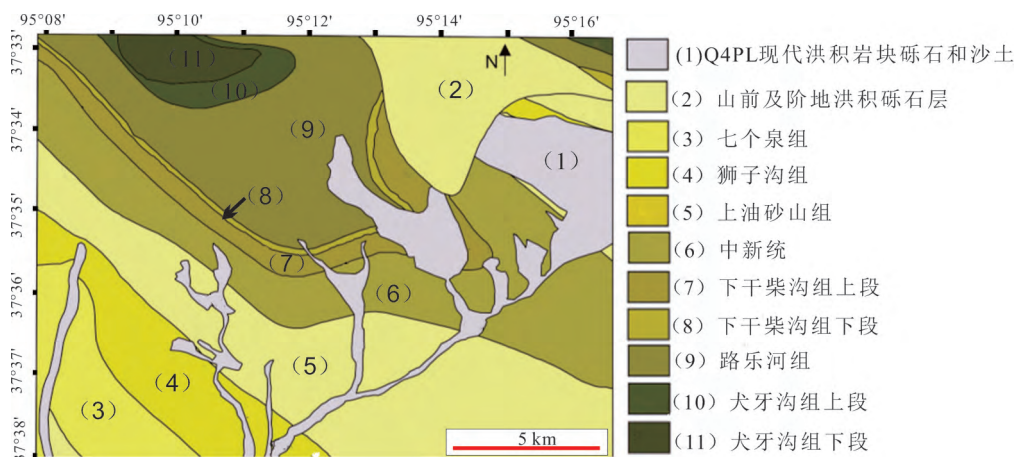
其中犬牙沟组以棕红色粗粒碎屑岩、泥质粉砂岩和泥岩组成;路乐河组岩性以厚层的砾岩及泥岩为主,砾岩颜色多以棕褐色、土红色和紫红色为主,局部夹泥质粉砂岩、长石砂岩和含砾粗砂岩互层;干柴沟组岩性以泥质岩为主,颜色以灰色、深灰色为主。红崖地区其实是雅丹地貌与丹霞地貌的混合区域,土层铁红色主要是由于土壤中含有较高的铁,其中犬牙沟组与路乐河组颜色偏红,与火星地表的直观颜色最为相似。

3.2 地形地貌对比研究

红崖核心区及周边主要存在 6 种类型的火星地貌,包括沙丘、河谷、树枝状结构、黑影区、多边形结构和雅丹地貌,在形态和结构上与火星类似。文中编号根据野外考察的先后顺序排列。

3.2.1 沙丘 红崖地区的沙丘以 SQ 编号(图 1 中紫色标记),主要分布在核心区域的北部。形貌上属于新月形沙丘(图 3),东南走向,是典型的单向风成沙丘。对比谷歌地图上的遥感图像和实地考察,发现沙丘存在向东迁移的现象, SQ2-1-1 和 SQ2-1-2 实地考察中两个沙丘的南端连在了一起(图 4)。沙丘的迎风坡角度在 $10 \sim 15^\circ$,背风坡角度为 30° 左右。宽可达上百米,高 20 余米(表 1)。其中 SQ1-1 和 SQ1-2 并不是真正的沙丘,而是疑似从西边吹来的沙堆积在河谷边缘而形成形似沙丘的地貌(图 3)。

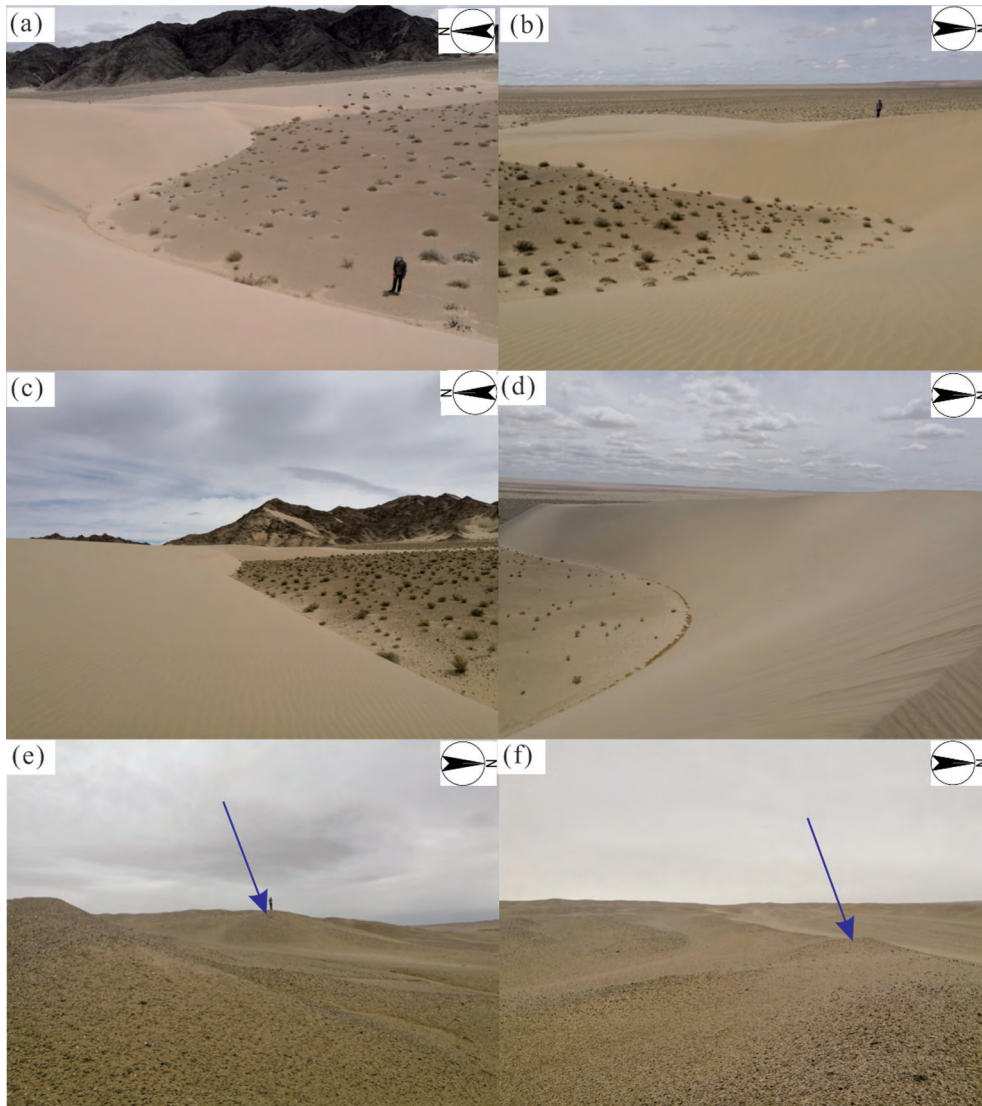
沙丘可以反映地表风的状态(风强、风向、随时间的变化)及局部地形和沙质的变化(Cantor, 2008),对于研究火星的地形、气候及大气环流等有着重要意义。沙丘在火星上广泛分布,其形态与地球沙丘相似,尤其是新月型沙丘(图 5)。与红崖地区相比,火星上的沙丘分布更紧密,规模更



主要区域为图 1b 中白色区域放大图;资料来源于全国地质资料馆

图 2 红崖地区地质简图

Fig. 2 The geological sketch map of the Red Cliff



(a)~(d)均为新月形沙丘,分别对应表1中的SQ2-1-2,SQ2-3,SQ3-3,SQ4-1;(e)(f)为表1中的SQ1-1和SQ1-2(蓝色箭头指示沙丘脊,沙粒度粗细不均,堆积高度较低)

图3 红崖地区的沙丘实景图

Fig. 3 Pictures of dunes in the Red Cliff

表1 红崖地区沙丘实测数据表

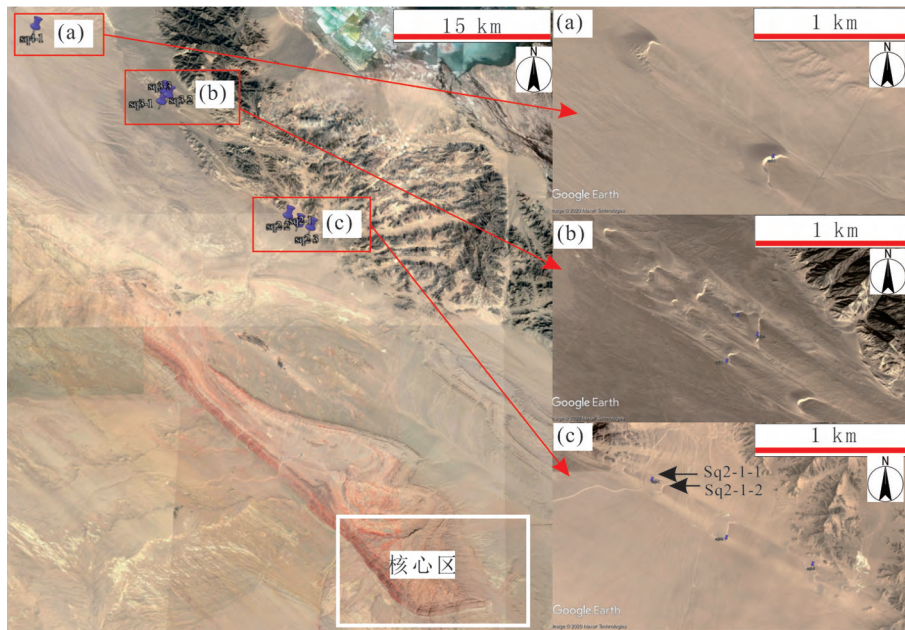
Table 1 The measured parameters of dunes in the Red Cliff

名称	坡脚1	坡脚2	坡脚3	高度/m	宽度/m	备注
SQ2-1-1	迎风 9~15°	背风 10~32°		7.06	97.43	
SQ2-1-2	迎风 9~32°	背风 30~32°		5.42	43.57	
SQ2-2	迎风 5~7°	背风 30~32°		8.31	121.92	
SQ3-1	迎风 7~15°	背风 21~34°		17.13	155.39	
SQ3-2	迎风 10~25°	背风 17~32°		23.00	156.16	
SQ3-3		背风 17~32°		10.00		
SQ4-1	迎风 7~22°	背风 17~34°		22.00	123.18	
SQ1-1	南 28°	东 20°	北 29°	5.73		堆积物
SQ1-2	南 27°	东 21°	北 26°	8.29		堆积物

大,宽度在几百米到几公里不等,高数十米,形态上更细长(Xiao et al., 2017a)。由于目前火星表面的气象数据有限(Bourke et al., 2010),缺乏对火星气

候变化的研究,而地球沙丘可作为研究火星大气与地表之间相互作用的指标(Rosalyn et al., 2007)。

3.2.2 河谷 由于季节性降水的影响,柴达木盆地

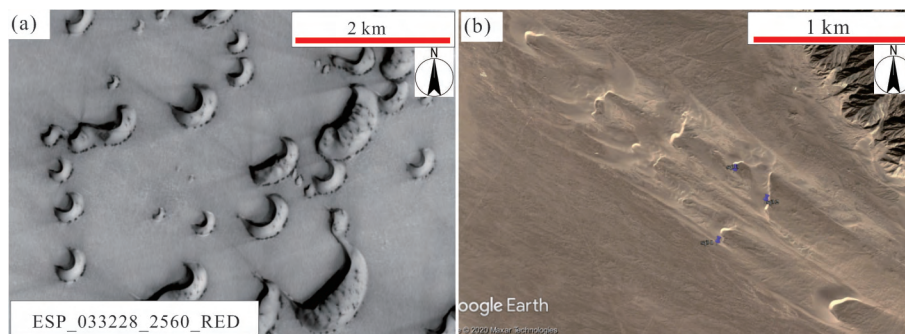


(a)(b)(c) 采样区域的沙丘聚集群的放大图(均为新月形沙丘);白色方框指示核心区域;紫色针形标志代表考察点。

图片来自谷歌地图

图 4 红崖地区沙丘分布图

Fig. 4 Distribution map of dunes in the Red Cliff



(a) 火星上的新月型沙丘(HiRISE 图像,ESP_033228_2560_RED);(b) 红崖地区的沙丘(谷歌地球图像)。紫色针形标志代表考察点。红崖的沙丘与火星的新月形沙丘形态类似,但火星上的沙丘分布更紧密,规模更大

图 5 火星与红崖沙丘形貌对比图

Fig. 5 Comparison of topographies of dunes between the Mars and the Red Cliff

存在大量河谷地貌,与火星非常相似(张云银, 2014)。红崖地区河谷密集,纵横交错,主要由中心高地向四周扩散。本次野外工作对 5 条河谷进行了考察(以 HG 编号,图 1 蓝色标记)。河谷高 2~30 m,两边坡度为 25~40°(表 2)。从北向南,河谷高度有增高趋势,颜色由红色变为黄色,倾斜角度变化很小(图 6)。

火星表面特别是南部高地存在广泛分布的河谷地貌,聚集成大量河谷网道。火星河谷地貌的成因不明,主要有两种假说:①火星曾经温暖潮湿,水流的持续活动形成了河谷网道,北部平原甚至可能存在海洋;②火星瞬态的热事件(温室气体、火山作

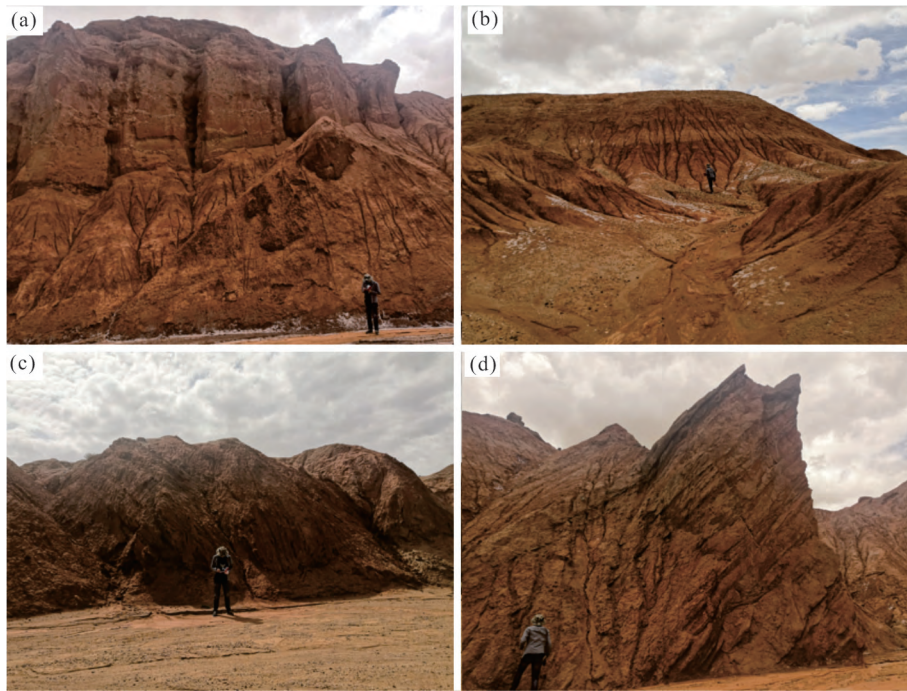
用或撞击作用等)造成短暂温暖条件形成融水(Hynek et al., 2010)。通过火星河谷与地球河谷对比,发现火星上大多数河谷对周围地貌侵蚀较浅,支流较少,可能是短时间内的雨水冲刷(Ramirez and Craddock, 2018)或是受地下水冰的影响所致(Fassett and Head, 2008)。

红崖地区的河谷地貌在形态上与火星类似(如,奥苏加河谷 Osuga 等)(图 7),但火星河谷规模更大。水源、基岩性质、原始地貌、当地气候以及后期改造过程等都会对河谷的形成产生影响。在火星表面存在大量的沉积岩,熔岩流以及火山碎屑等物质,与地球有很大的差异性。后期火山喷发,风

表 2 红崖地区河谷实测数据表

Table 2 Measured parameters of valleys in the Red Cliff

名称	高度/m	坡脚 1/°	坡脚 2/°	名称	高度/m	坡脚 1/°	坡脚 2/°
HG1-1	15.16	西 36	东 40	HG4-2	35.19	西 47	东 45
HF1-2	22.80	西 37	东 41	HG4-3	14.39	西 41	东 40
HG1-3	32.12	西 40	东 30	HG4-4	33.85	西 45	东 43
HG1-0	12.86	西 27	东 37	HG5-1	4.02	西 32	东 25
HG2-1	11.93	西 33	南 25	HG5-2	3.43	东 42	
HG2-2	5.73	西 30	东 28	HG5-3	2.09	西 34	东 33
HG2-3	3.39	西 39		HG5-4	3.92	东 37	
HG2-4	10.11	西 32		HG5-5	6.64	东 44	
HG2-5	4.14			HG5-6	4.19	西 42	
HG3-1	8.00	西 44	东 37	HG5-7	22.77	西 32	东 33.5
HG3-2	12.00	西 37	东 37	HG5-8	29.82	西 37.5	东 27
HG3-3	14.22	西 50	东 31	HG5-9	10.07	西 42	东 21
HG4-1	5.91	西 41	东 40				



(a)~(d)分别是 HG1-3, HG2-1, HG2-3 和 HG3-1;河谷两侧风化侵蚀严重,布满树枝状结构

图 6 红崖河谷地貌实景

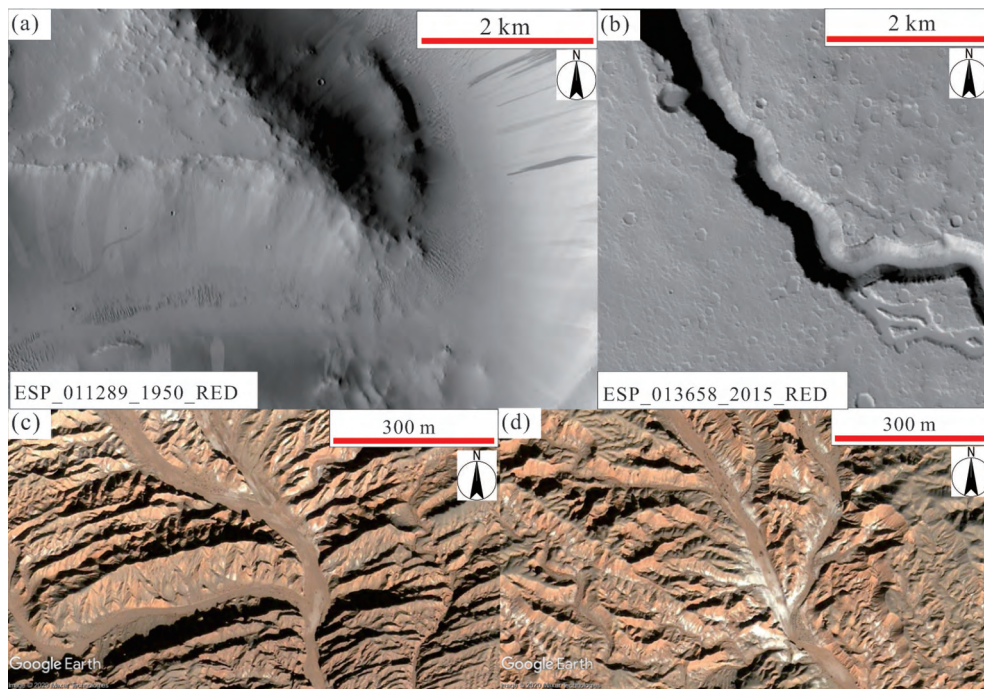
Fig. 6 Landscapes of valleys in the Red Cliff

化侵蚀和地质过程(地震)也会造成河谷形态上的改变,甚至掩埋河谷(Xiao et al., 2017)。就柴达木地区而言,河谷类型主要受基岩性质的影响(Goro, 2018),而红崖提供了一个较好的河谷研究区。

3.2.3 树枝状结构 红崖地区的树枝状结构主要分布在河谷两边的边壁,数量较多,形态各异(图 8)。长度 2~40 余米不等,大多数主干长占总长的 1/2 至 1/3。树枝状结构以 SZ 编号(图 1 黄色标记)。红崖地区的树枝状结构是由于降水之后,雨水从山顶流向河谷冲刷而成,由于水量少,所以形成的树枝状结构也很小,无法在遥感

影像上分辨。

火星上的树枝状结构也被称作冲沟(gullies),在火星 30°N 以北大量出现。冲沟地貌主要出现在陡峭斜坡上,尤其是在河谷边缘以及撞击坑的边缘(图 8)(Malin and Edgett, 2000)。主要成因假说包括:冰雪融水或地下冰融化导致(Heldmann and Mellon, 2007);干冰在斜坡上移动形成(Kolb et al., 2010)。还有一些独特的冲沟会出现在沙丘上,并呈现出季节性变化(Masse et al., 2016)。红崖地区的冲沟在形态上与火星十分相似(图 8),但受限于遥感数据的分辨率,火星上小型的冲沟无法清楚观



(a) 斯卡曼德洛斯谷 (Scamander Vallis; ESP_011289_1950_RED); (b) 埃律西昂区域 (Elysium Region) 中的河谷 (ESP_013658_2015_RED); (c) (d) 红崖河谷的遥感影像 (谷歌地球)

图 7 火星与红崖河谷形貌对比

Fig. 7 Comparison of valleys between the Mars and the Red Cliff

测。对火星和柴达木盆地冲沟的形态和地质背景进行比较研究,可能是限制火星冲沟形成原因的有效方法(Xiao et al., 2017)。

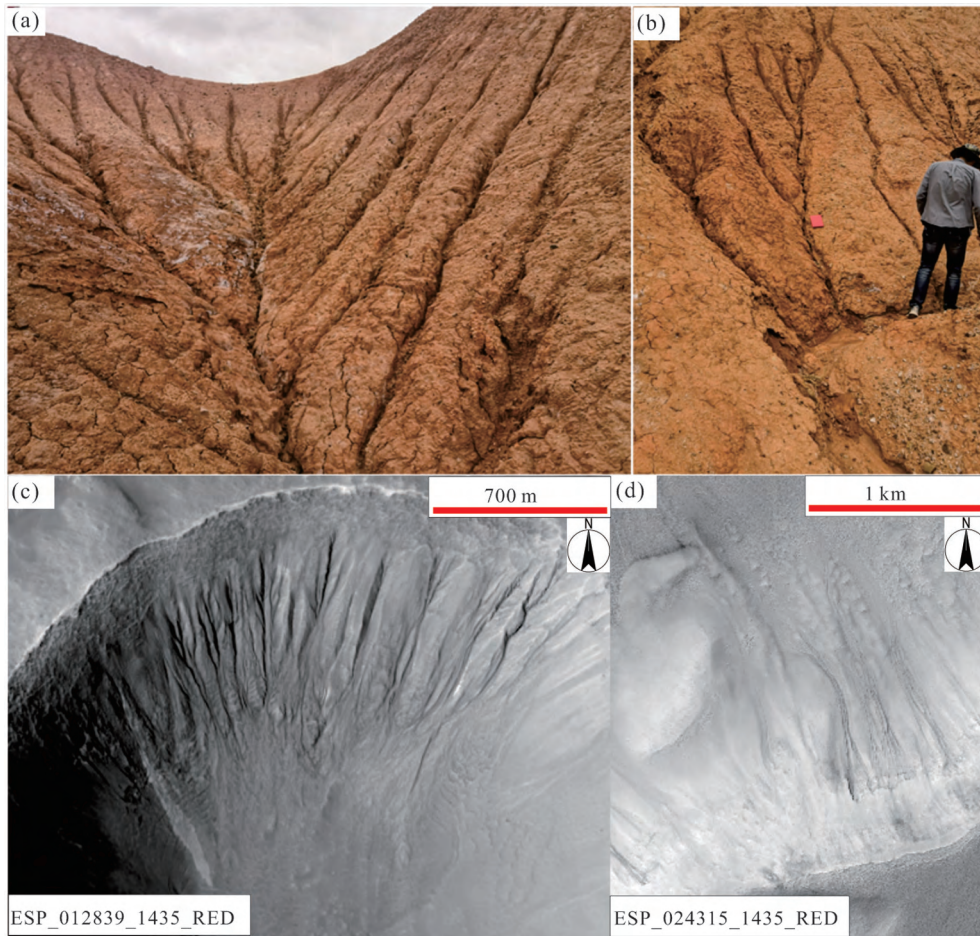
3.2.4 黑影区域 红崖地区存在两处黑影区域,分布在核心区的北部和西北部。其特征是颜色明显比周围深,呈黑色影状(图 9)。红崖黑影区的土质松软,有盐覆盖,颜色较周边区域深,是由于含水量较高造成,推测是盐湖蒸发后的残留(图 10)。

火星上普遍存在黑影区域(图 9),它是由大量的黑色条纹组成,常出现在撞击坑、沟谷和山谷的陡坡上。它们通常是竖直的,但也呈弯曲或 S 形,其宽度为 20~200 m 不等,有的可达几百米,甚至 1 000 多米(Chuang et al., 2010)。目前尚不清楚火星黑影区域的成因,也无法测量黑影区与其周围是否存在差异,主要假说包括:尘暴发生后暴露出的下方的黑色物质;松散的细粒物质在陡峭的斜坡上大量迁移导致;水与其他挥发性物质相互作用形成(Ferris et al., 2002)。黑色区域是火星上可以直接观察到的少数现代地质现象之一,对理解现代火星地质过程非常重要。柴达木盆地红崖地区可为黑色条纹的相关研究提供条件。

3.2.5 多边形结构 核心区域的东部,有地面干裂形成的多边形裂纹(图 11c)。根据气候条件,推断

干燥和热收缩是形成多边形结构的主要原因。柴达木盆地的其他地区也有类似的多边形结构出现。Dang 等(2018)对柴达木大浪滩地区的多边形结构进行了研究,认为其主要由蒸发作用形成,他们采样分析发现多边形结构的成分主要为盐岩、长石、石英和黏土,而不同尺寸的多边形结构中矿物的含量有所不同,并据此认为多边形结构的大小与矿物成分存在重要联系(Dang et al., 2018)。

多边形结构是火星表面的典型地貌之一,可以从高分辨率的遥感影像中清楚分辨(图 11a, 11b)。火星表面的多边形结构大小从 2~3 m 到 10 km 都有分布(Seibert and Kargel, 2001)。大型的多边形结构在火星北半球密集分布,大小为 3~10 km,宽度为 200~800 m(Tanaka, 1986)。小型的多边形结构大都分布于火星的中高纬度地区,最大的聚集区域在火星北半球的乌托邦盆地(Utopia Basin),平均宽度约为 50 m。Ye 等(2019)在火星南部高地发现了 600 多个含氯的沉积物,这些区域突出的地貌特征是具有多边形结构,他们认为这些多边形可能保存有机物(Ye et al., 2019)。火星上的多边形结构目前成因仍有争议。基于对地球多边形结构的成因研究,推测火星上多边形结构也由干旱所致。但另一方面,火星的多边形结构具有独特的地貌特征和



(a)(b)分别是 SZ1-1 和 SZ4-1;(c)撞击坑边缘上的沟谷(ESP_012839_1435_RED);(d)河谷边缘的沟谷(ESP_024315_1435_RED)

图 8 红崖和火星树枝状结构形貌对比图

Fig. 8 Comparison of dendritic structures between the Red Cliff and Mars

地球化学的性质。成因机理假说包括火山、干燥、构造作用和热收缩等(El Maarry et al., 2010; Harrison et al., 2015)。对柴达木红崖多边形结构的研究可为理解火星表面与盐作用有关的多边形结构的成因机理、地表和地下环境、有机物保存等提供支持。

3.2.6 雅丹地貌 雅丹地貌是因风力或洪水等作用形成的,第三纪(特别是晚第三纪)以来未完全固结成岩的沉积物(如河湖相土状沉积物),主要分布于极端或部分干旱区(牛清河等, 2011)。红崖地区的雅丹主要分布在核心区域的东部,多为鲸鱼状雅丹,走向西北,平行排布,规模较小(图 1,以 YD 编号,绿色标记)。

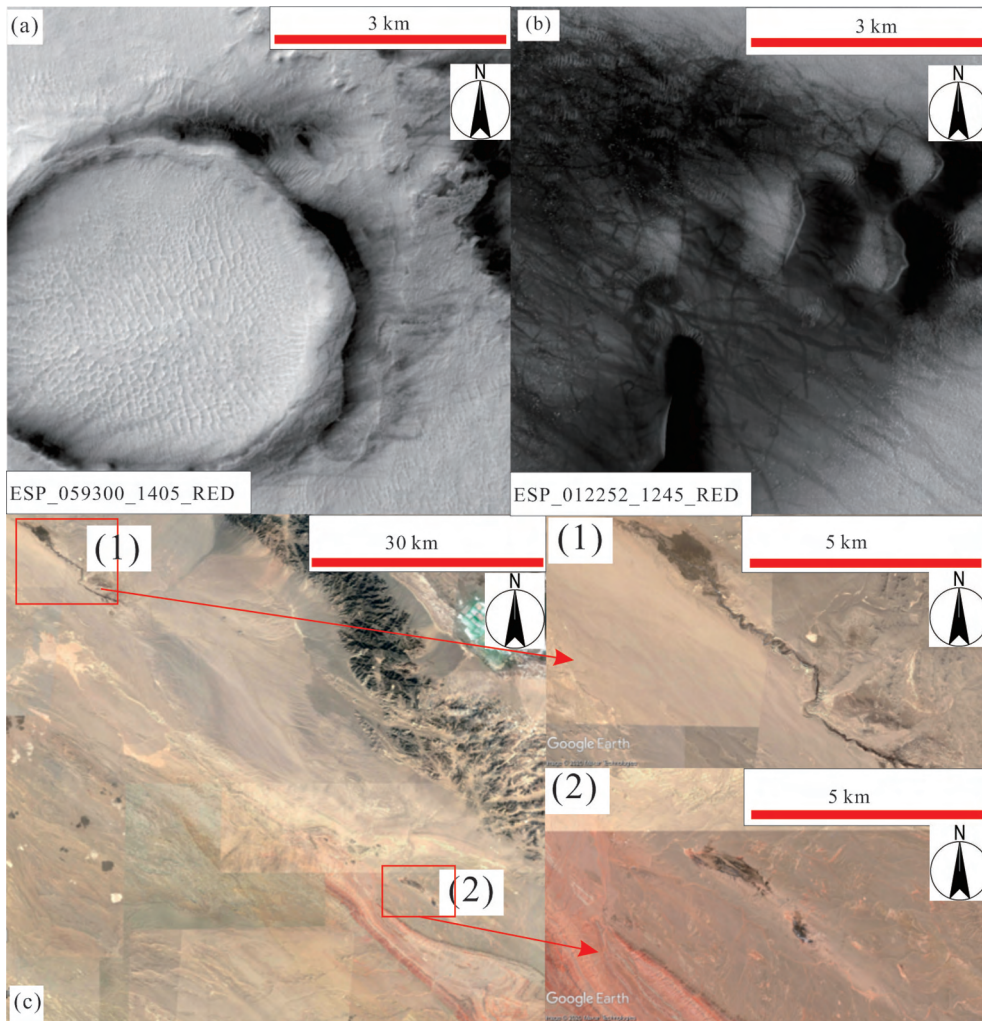
雅丹地貌是火星上的典型地貌之一。在梅杜莎槽沟(Medusae Fossae)和火星赤道附近大量分布。相较于地球上的雅丹,火星上的规模更大,分布更密集,形态也更加多样化,如长条状、方舟状等(图 12)。火星上组成雅丹的物质相对松散,可能是

风成尘土或火山灰(Mandt et al., 2008)。有学者将火星的埃律西昂平原(Elysium Planitia)和柴达木盆地雅丹形态参数进行对比分析,结果显示:二者的长宽比十分接近;前者呈椭圆状、后者呈鲸背状,可能是前者受两种反向风的影响,而后者则常年受盛行风的影响所致;前者雅丹表面崩裂痕迹较明显,后者雅丹表面崩裂痕迹不明显,可能是形成雅丹的物质和温差环境不同所致(Li et al., 2018)。

3.3 红崖地区岩石矿物组成与火星对比

柴达木盆地是一个沉积盆地,与火星表面矿物可类比的主要是次生矿物,例如盐类、黏土、石英等。红崖地区的岩石土壤中的主要矿物组成有石英、钠长石、斜长石、白云母、方解石、石膏、斜绿泥石、石盐(表 3、表 4),其中石英、碳酸盐、石膏、石盐、斜长石、碱性长石和绿泥石在火星表面都被探测到(表 5)(Ehlmann and Edwards, 2014)。

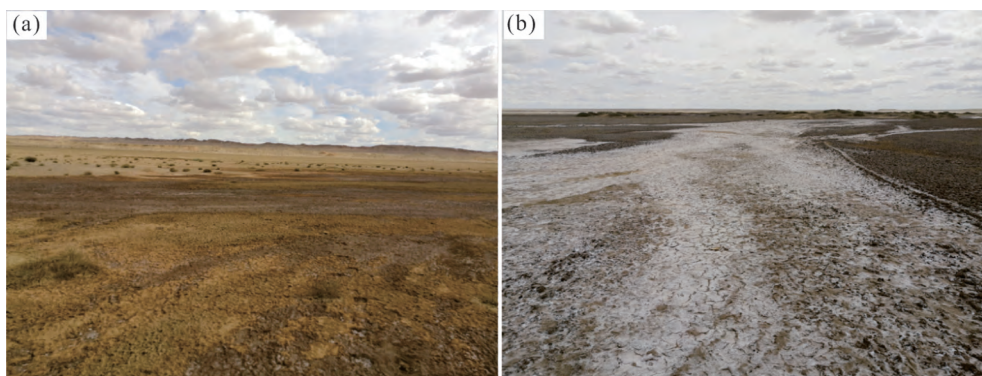
火星壳主要由玄武岩组成,主要元素有 Si、O、Fe、Mg、Al、Ca 和 K 等。火星表面曾广泛存在过水



(a) 火星撞击坑上的黑影 (ESP_059300_1405_RED); (b) 火星沙丘周围的黑影 (ESP_012252_1245_RED);
(c) 红崖地区的黑影图片 (1 和 2 是放大图)

图 9 火星 (HiRISE) 与红崖地区 (谷歌地图) 的黑影对比图

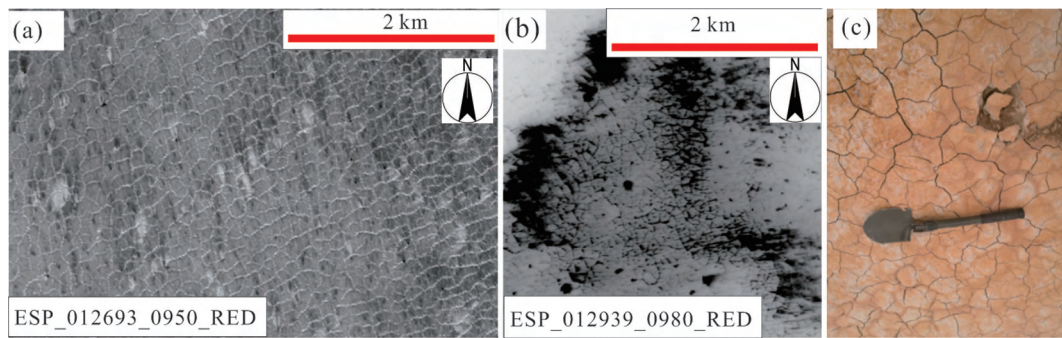
Fig. 9 Comparison of streaks between the Mars (HiRISE images) and the Red Cliff (Google map images)



土质松软, 有盐覆盖 (a) (白色为盐层), 颜色较周边区域深 (b)

图 10 红崖地区黑影实拍图

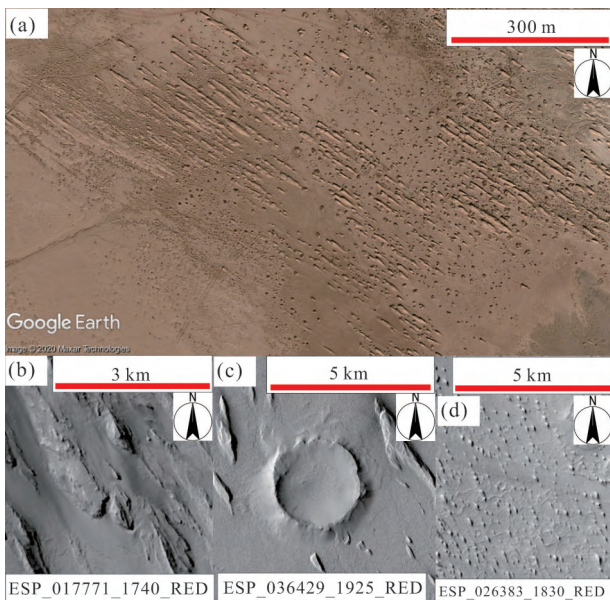
Fig. 10 The streaks in the Red Cliff



(a)(b)火星上的多边形结构(ESP_012693_0950_RED;ESP_012939_0980_RED);(c)红崖地区的多边形结构

图 11 火星(HiRISE)与红崖地区的多边形结构对比图

Fig. 11 Comparisons of the polygonal structures of the Mars (HiRISE images) and the Red Cliff



(a) 红崖地区的雅丹(谷歌地图);(b)位于火星亚马逊(Amazonis Region)南部的雅丹(ESP_017771_1740_RED);(c)位于火星亚马逊平原(Amazonis Planitia)的雅丹(ESP_036429_1925_RED);(d)位于火星艾奥利斯平原(Aeolis Planum)上的雅丹(ESP_026383_1830_RED)

图 12 红崖地区与火星(HiRISE)雅丹对比图

Fig. 12 Comparisons of the Yardang Landforms of the Red Cliff and Mars

活动,留下了多种类型的次生矿物,例如赤铁矿、层状硅酸盐(黏土矿物)、针铁矿、黄钾铁矾、硫酸铁矿物、蛋白石、石膏、碳酸盐和绿泥石等(Weitz et al., 2010)。相比之下,地球大陆地壳主要由花岗岩组成,主量元素上也与玄武质火星壳存在差异(Mesween et al., 2009)。整体而言,地球类比区中,除冰岛等玄武岩为主的类比区外,其他类比区虽然可能存在某些可类比的矿物,但在化学组成上与火星无法直接类比。近年来随着火星可见近红外光谱仪的应用及就位探测,在火星表面探测到的矿物种

类越来越多(Viviano-Beck et al., 2014)。目前对火星次生矿物的成因主要依赖模拟实验研究、火星类比区研究和数值模拟研究。柴达木红崖地区所发现的类火星次生矿物(碳酸盐、石膏和绿泥石等),为研究类火星盐类和黏土矿物,以及次生矿物中生物标志物和有机物的保存和探测,提供了天然的实验室。

对大柴旦红崖及周边地区的野外踏勘采样和类火星的对比研究表明,红崖地区在气候环境、地形地貌、矿物岩石类型等方面都与火星类似,可为未来火星探测器和载荷的地面验证试验及相关的科普科教活动等提供天然实验场地。

4 结论

(1)气候环境:红崖地区位于柴达木盆地内,海拔高、紫外辐射强、降水稀少、年平均温度低,整体上类似于现代火星的表面环境。

(2)地质背景:红崖地区是雅丹地貌与丹霞地貌的混合区域,土层呈铁红色,类似火星地表的直观颜色。

(3)地形地貌:红崖及其周边区域存在多种类火星地貌,包括河流(河谷、树枝状结构)、风成地貌(沙丘、雅丹)、古湖泊(多边形结构、黑影区域)、盐滩等,形貌和结构上类似火星,是研究火星地貌结构和未来探测器、载荷野外实验的天然试验场。

(4)岩石矿物类型:红崖区域存在多种类火星矿物,包括石英、碳酸盐、石膏、石盐、斜长石、碱性长石和绿泥石等,可为类火星盐类、黏土矿物等的研究提供支持。

致谢:感谢中国科学院青海盐湖研究所李俊博士、李玉龙博士的大力支持。

表 3 红崖地区地表岩石样品矿物组成

Table 3 Mineral components of surface rock samples in the Red Cliff

(%)

编号	采样点坐标	石英	钠长石	斜长石	白云母	方解石	石膏	斜绿泥石	黄铁矿	针铁矿	石盐	蒙脱石	文石	白云石
1	95°15'15"E 37°24'55"N	71	19	—	—	—	—	—	5	5	—	—	—	—
2	95°24'41"E 37°26'54"N	11	—	—	—	—	89	—	—	—	—	—	—	—
3	95°08'22"E 37°29'41"N	44	12	10	16	12	—	6	—	—	—	—	—	—
4	95°11'20"E 37°29'34"N	52	8	9	23	1	—	6	—	—	—	1	—	—
5	95°14'60"E 37°28'20"N	—	—	—	—	100	—	—	—	—	—	—	—	—
6	95°07'04"E 37°33'02"N	8	—	—	—	32	—	—	—	—	—	—	60	—
7	95°07'04"E 37°30'39"N	32	26	13	16	4	—	5	—	—	—	—	—	4
8	95°08'32"E 37°27'60"N	25	—	—	—	3	4	—	—	—	68	—	—	—
9	95°16'17"E 37°34'10"N	42	15	10	16	4	7	5	—	—	—	—	—	1
10	95°95'40"E 37°31'44"N	47	13	9	17	4	4	6	—	—	—	—	—	—

注:选取所采岩石样品中 10 个具代表性的样品;“—”表示无。

表 4 红崖地区地表土壤样品矿物组成

Table 4 Mineral components of surface soil samples in the Red Cliff

(%)

编号	采样点坐标	石英	钠长石	斜长石	白云母	方解石	石膏	斜绿泥石	石盐	烧石膏	蒙脱石	采样点备注
1	95°07'04"E 37°33'02"N	55	9	9	16	1	3	7	—	—	—	第四纪丘陵地貌
2	95°12'32"E 37°33'20"N	25	7	13	26	10	7	8	4	—	—	松散冲积物
3	95°07'04"E 37°30'39"N	42	15	7	16	2	10	6	—	2	—	第四纪覆盖层
4	95°08'23"E 37°29'41"N	50	16	8	18	3	—	5	—	—	—	河谷深处,表面无植被
5	95°09'49"E 37°33'20"N	48	10	—	22	6	8	5	—	—	1	松软泥质风化壳
6	95°09'50"E 37°30'37"N	56	12	13	—	4	7	8	—	—	—	第四纪覆盖层
7	95°11'14"E 37°28'00"N	26	13	—	24	—	—	10	—	27	—	风化严重的砂岩层,呈土黄色
8	95°12'36"E 37°26'55"N	40	18	12	17	4	3	5	1	—	—	风化严重的砂岩层,呈红色
9	95°20'41"E 37°24'55"N	48	15	9	17	4	—	7	—	—	—	淤泥风化物
10	95°07'04"E 37°24'55"N	47	14	10	16	3	3	6	1	—	—	第四纪覆盖层,表面无植被

注:选取了所采岩石样品中 10 个具代表性的样品;“—”表示无。

表 5 红崖地区类火星矿物

Table 5 Analogue minerals of Mars in the Red Cliff

矿物	化学式	火星上的出露点
斜长石	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8\text{-CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$	南部高地的主要矿物之一;古谢夫撞击坑(Gusev Crater)的碱性火山岩中检测到了斜长石;大气尘埃的可见近红外光谱中发现了斜长石的吸收峰
碱性长石	$(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	盖尔撞击坑(Gale Crater)的沉积岩中发现了长石
石英	SiO_2	水手大峡谷(Valles Marineris)和古谢夫撞击坑中发现了透明的二氧化硅;火星的三角洲和冲积扇地貌中发现了大量的不透明二氧化硅;大瑟提斯(Syrtis Major)的沉积物中发现了石英和水合二氧化硅
碳酸盐	$(\text{Mg,Fe,Ca})\text{CO}_3$	古谢夫撞击坑的岩石露头中发现了富含镁铁的碳酸盐;惠更斯撞击坑(Huygens Crater)边缘发现了碳酸盐;在尼利槽沟(Nili Fossae)被侵蚀的地层中发现了碳酸镁;绿谷(Green Valley)的土壤中检测到碳酸钙
石膏	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	盖尔撞击坑沉积岩的填充脉中发现了石膏;萨瑞南高地(Terra Sirenum)的撞击坑沉积物中发现了石膏
石盐	NaCl	火星南部高地已探测到约 640 个含氯的盐沉积
绿泥石	$(\text{Fe,Mg,Al})_6(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	大瑟提斯(Syrtis Major)以北的撞击坑溅射物中发现了绿泥石;水手大峡谷的沟槽中发现了绿泥石

参考文献(References):

- Angles A, Li Y L. 2017. The western Qaidam basin as a potential Martian environmental analogue: An overview. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 122: 856-888
- Baldrige A M, Farmer J D, Moersch J E. 2004. Mars remote-sensing analog studies in the Badwater Basin, Death Valley, California. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 109: E12006
- Bourke M C, Lancaster R, Fenton R K, Parteli R J R, Zimbleman J R, Radebaugh R. 2010. Extraterrestrial dunes: An introduction to the special issue on planetary dune systems. *Geomorphology*, 121: 1-14
- Cabrol N A, Wettergreen D, Warren-Rhodes K, Grin E A, Moersch J, Diaz G C, Cockell C S, Coppin P, Demergasso C, Dohm J M, Ernst L, Fisher G, Glasgow J, Hardgrove C, Hock A N, Jonak D, Marinangeli L, Minkley E, Ori G G, Piatek J, Pudenz E, Smith T, Stubbs K, Thomas G, Thompson D, Waggoner A, Wagner M, Weinstein S, Wyatt M. 2007. Life in the Atacama: Searching for life with rovers (science overview). *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 112: 583-590
- Cantor B A. 2008. Recent aeolian dune change on Mars. *Geomorphology*, 94: 247-255
- Chang H, Li L, Qiang X, Garzzone C N, Pullen A, An Z. 2015. Magnetostratigraphy of Cenozoic deposits in the western Qaidam basin and its implication for the surface uplift of the northeastern margin of the Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 430: 271-283
- Chuang F C, Beyer R A, Bridges N T. 2010. Modification of martian slope streaks by eolian processes. *Icarus*, 205: 154-164
- Dang Y N, Xiao L, Xu Y, Zhang F, Huang J, Wang J, Zhao J N, Komatsu G, Yue Z. 2018. The polygonal surface structures in the Dalangtan Playa, Qaidam basin, NW China: Controlling factors for their formation and implications for analogous martian landforms. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 123: 1910-1933
- Ehlmann B L, Edwards C S. 2014. Mineralogy of the martian surface. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 42: 291-315
- El Maarry M R, Markiewicz W J, Mellon M T, Goetz W, Dohm J M, Pack A. 2010. Crater floor polygons: Desiccation patterns of ancient lakes on Mars? *Journal of Geophysical Research-Planets*, 115: E10006
- Essefi E, Komatsu G, Fairen A G, Chan M A, Yaich C. 2014. Groundwater influence on the aeolian sequence stratigraphy of the Mecher-tate-Chrita-Sidi El Hani system, Tunisian Sahel: Analogies to the wet-dry aeolian sequence stratigraphy at Meridiani Planum, Terby crater, and Gale crater, Mars. *Planetary and Space Science*, 95: 56-78
- Fassett C I, Head J W. 2008. Valley network-fed, open-basin lakes on Mars: Distribution and implications for Noachian surface and subsurface hydrology. *Icarus*, 198: 37-56
- Ferris J C, Dohm J M, Baker V R, Maddock T. 2002. Dark slope streaks on Mars: Are aqueous processes involved? *Geophysical Research Letters*, 29(10): 1490
- Goro K. 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
- Harrison T N, Osinski G R, Tornabene L L, Jones E. 2015. Global documentation of gullies with the Mars Reconnaissance Orbiter Context Camera and implications for their formation. *Icarus*, 252: 236-254
- Heldmann J L, Mellon M T. 2007. Observations of martian gullies and constraints on potential formation mechanisms. *Icarus*, 188(2): 324-344
- 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-Planets*, 115(E9): E09008
- Kolb K J, McEwen A S, Pelletier J D. 2010. Investigating gully flow

- emplacement mechanisms using apex slopes. *Icarus* 208(1): 132–142
- Kong F, Zheng M, Hu B, Wang A, Ma N, Sobron P. 2018. Dalangtan Saline Playa in a Hyperarid Region on Tibet Plateau-I: Evolution and Environments. *Astrobiology*, 18: 1243–1253
- Li L, Dong Z, Li C, Cui X, Xiao W, Xiao N. 2018. Comparison of Yardang morphology on the Earth and the Mars; Taking the Elysium Planitia and the Qaidam basin for an example. *Journal of Desert Research*, 38: 716–723
- Malin M C, Edgett K S. 2000. Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, 288: 2330–2335
- Mandt K E, de Silva S L, Zimbelman J R, Crown D A. 2008. Origin of the Medusae Fossae Formation, Mars: Insights from a synoptic approach. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 113: E12011
- Masse, Marion, Conway, Susan J, Gargani, Julien, Pasquon, Kelly. 2016. Present-day formation and seasonal evolution of linear dune gullies on Mars. *Icarus International Journal of Solar System Studies*
- Mesween H Y, Taylor G J, Wyatt M B. 2009. Elemental Composition of the Martian Crust. *Science*, 324: 736–739
- Murchie S L, Seelos F P, Hash C D, Humm D C, Malaret E, McGovern J A, Choo T H, Seelos K D, Buczkowski D L, Morgan M F, Bamouin-Jha O S, Nair H, Taylor H W, Patterson G W, Harvel C A, Mustard J F, Arvidson R E, McGuire P, Smith M D, Wolff M J, Titus T N, Bibring J P, Poulet F. 2009. Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars investigation and data set from the Mars Reconnaissance Orbiter's primary science phase. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 114(E2): E00D07
- Ramirez R M, Craddock R A. 2018. The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars. *Nature Geoscience*, 11: 230–237
- Rieser A B, Neubauer F, Liu Y J, Ge X H. 2005. Sandstone provenance of north-western sectors of the intracontinental Cenozoic Qaidam basin, western China: Tectonic vs. climatic control. *Sedimentary Geology*, 177(1/2): 1–18
- Rosalyn K, Hayward, Kevin F, Mullins, Lori K, Fenton, Trent. 2007. Mars Global Digital Dune Database and initial science results. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 112: E11007
- Seibert N M, Kargel J S. 2001. Small-scale martian polygonal terrain: Implications for liquid surface water. *Geophysical Research Letters*, 28: 899–902
- Tanaka K L. 1986. The Stratigraphy of Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 91: E139–E158
- Viviano-Beck C E, Seelos F P, Murchie S L, Kahn E G, Seelos K D, Taylor H W, Taylor K, Ehlmann B L, Wisemann S M, Mustard J F, Morgan M F. 2014. Revised CRISM spectral parameters and summary products based on the currently detected mineral diversity on Mars. *Journal of Geophysical Research - Planets*, 119: 1403–1431
- Wang A, Sobron P, Kong F, Zheng M, Zhao Y Y S. 2018. Dalangtan Saline Playa in a Hyperarid Region on Tibet Plateau: II. Preservation of Salts with High Hydration Degrees in Subsurface. *Astrobiology*, 18: 1254–1276
- Weitz C M, Milliken R E, Grant J A, McEwen A S, Williams R M E, Bishop J L, Thomson B J. 2010. Mars Reconnaissance Orbiter observations of light-toned layered deposits and associated fluvial landforms on the plateaus adjacent to Valles Marineris. *Icarus*, 205: 73–102
- Xiao L, Wang J, Dang Y, Cheng Z, Huang T, Zhao J, Xu Y, Huang J, Xiao Z, Komatsu G. 2017. A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Science Reviews*, 164: 84–101
- Ye B L, Huang J, Michalski J, Xiao L. 2019. Geomorphologic characteristics of polygonal features on chloride-bearing deposits on Mars: Implications for martian hydrology and astrobiology. *Journal of Earth Science*, 30: 1049–1058
- Ye P J, Sun Z Z, Rao W, Meng L Z. 2017. Mission overview and key technologies of the first Mars probe of China. *Science China (Technological Sciences)*, 60: 649–657
- 何先虎. 2014. 大柴旦盐湖柱硼镁石矿床的形成环境与气候特征. 学位论文. 西宁: 中国科学院研究生院(青海盐湖研究所), 1–77
- 牛清河, 屈建军, 李孝泽, 董光荣, 张克存, 韩庆杰. 2011. 雅丹地貌研究评述与展望. *地球科学进展*, 26(5): 516–527
- 张继民. 2006. 柴达木盆地纪行(一). *知识就是力量*, (6): 42–45
- 王惠勇, 谭明友, 张云银. 2014. 柴达木盆地路乐河组古地理特征及其演化. *中国煤炭地质*, (10): 7–12, 21

(本文责任编辑:刘莹;英文审校:张兴春)