

火星地下冰川:新发现的意义

郑永春¹, 赵伟方^{1,2}

1. 中国科学院国家天文台, 北京 100101

2. 北京航空航天大学, 北京 100191

摘要 火星上是否有水以及水的储藏位置和规模, 不仅是一个科学问题, 更与未来载人登陆火星和火星移民密切相关。作为太阳系中与地球最为相似的行星, 火星表面同样覆盖了厚厚的沉积物, 但这些沉积物之下究竟有什么, 对人类来说一直是个谜。近期, 科学家发现, 火星中纬度地区的地下储藏大量纯净的水冰。本文评论火星地下冰川这一发现的意义, 讨论了科学家究竟发现了什么、如何证明观测到的物质确实是地下冰层、这些冰层是如何形成的、冰层所记录的历史等相关问题, 并展望了未来火星探测中如何利用这些水冰资源。

关键词 断崖; 水冰; 地下冰层; 光谱分析

1 火星发现水的历程

2018年1月12日, Dundas C M等在《Science》文章称, 科学家在火星上探测到8条发生侵蚀的断崖, 从中发现了巨量的水冰资源^[1]。这些水冰的纯度非常高, 冰层厚度从地下1~2 m深处, 一直延伸到地下100多米不等。由于断崖上的水冰长期暴露在大气中, 因此正在慢慢升华, 进而导致断崖不断收缩。

火星上有水早已不是新闻。人类已经开展了40多次火星探测, 获得了大量与水有关的发现, 包括: 冲沟、三角洲、冲积扇等流水作用的遗迹(图1); 被水浸泡过的岩石; 火星快车发现了火星上的海岸线; 好奇号发现了含有粘土矿物的沉积岩层, 还发现了水流冲击形成的鹅卵石。这些发现证实, 火星上曾经有过大规模的水。

但是, 火星上的水究竟储藏在什么地方, 储量有多少, 特别是地下冰层一直没有得到确认。2008年, 凤凰号着陆器在火星68°N附近, 挖到了高纯度的水冰, 但凤



这些冲沟宽1~10 m, 与流水作用有关。该图片为火星勘测轨道飞行器于2011年1月14日拍摄

图1 火星海拉斯盆地中发育的冲沟
Fig. 1 Gullies developed in the Hellas basin on the Mars
(图片来源: REUTERS/NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona/Handout)

收稿日期: 2018-03-06; 修回日期: 2018-03-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41490633)

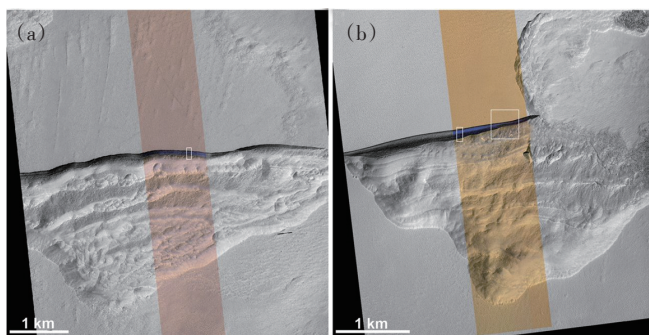
作者简介: 郑永春, 研究员, 研究方向为月球与行星地质, 电子信箱: zyc@nao.cas.cn

引用格式: 郑永春, 赵伟方. 火星地下冰川: 新发现的意义[J]. 科技导报, 2018, 36(6): 17-20; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.06.002

凰号的着陆点位于较高纬度,温度较低,发现水冰属于意料之中^[2]。接下来,科学家希望知道,在比这更低纬度的中纬度地区,是否也有水冰。2009年,科学家终于在 $40^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 的新鲜撞击坑周围,发现了含有水冰的溅射物^[3]。2015年,Lujendra Ojha等发现,在火星表面的某些特定位置,可能至今仍有液态水^[4]。发现液态水的区域,位于火星上的“季节性坡纹”,即山坡上的纹路随季节更替而出现显著变化的地方。当气温上升时,季节性坡纹开始形成并发育壮大;而当气温下降、天气寒冷时,这些坡纹又会消失不见。

2 火星地下冰层如何确证

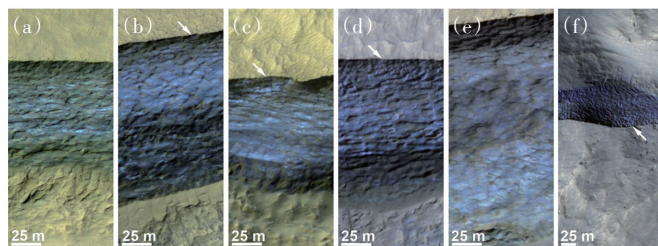
此次利用火星勘察轨道器(MRO)探测到的数据,在8条断崖上,分析出了地下冰层的垂直剖面结构,包括分层情况、厚度以及水冰的纯度。火星勘察轨道器上,搭载了一台高分辨率成像科学实验相机(HiRISE),配备0.5 m孔径镜头,是有史以来最强悍深空探测成像设备,最高分辨率可达到每像素0.3 m,相当于可观测到篮球大小的物体。HiRISE拍摄的高分辨率图像显示,这些地下冰层均位于面向极地、非常陡峭、具有水流侵蚀地特征的断崖上(图2^[1])。其中,断崖1~7位于 $55^{\circ}\text{S}\sim 58^{\circ}\text{S}$,断崖8位于 54.8°N 的Milankovič(米兰科维奇)火山口的断崖群。



(a)断崖1,(b)断崖2,断崖恰好位于山坡与凹陷地形之间,因此而暴露出冰层的位置(图中小白框所在位置),图上方为山脉,光从左侧射入

图2 HiRISE拍摄的火星地下冰层高分辨率图像
Fig. 2 Pits with scarps exposing ice captured by the High Resolution Imaging Science Experiment, HiRISE

在增强后的HiRISE彩色图像(图3^[1])中,相对周围地形,每条断崖的颜色都偏蓝,与冰层的表现一致,表明断崖上暴露的物质中含有水冰。

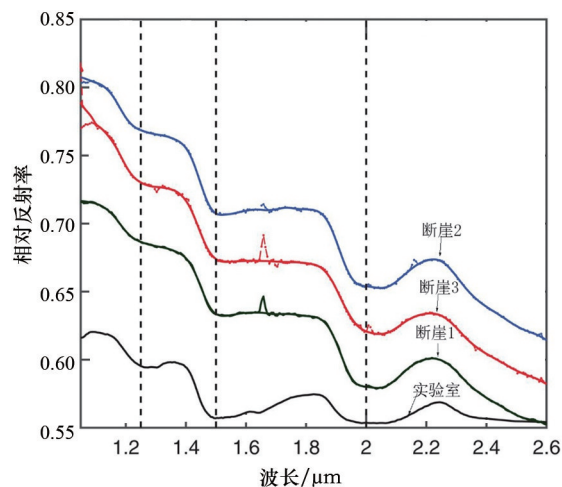


(a)~(e)断崖1~5,坡向指向崖底,均为自上而下;(f)米兰科维奇火山口,坡向指向崖顶;图中,箭头所指蓝色物质的位置非常接近地表;在这几条断崖中,可以看到明显的带状和层状分布特征;断崖5显示出了鲜明的颜色变化,且有多条纵向的细小裂缝,将冰层分割开来。

图3 断崖冰层在春末或夏初的彩色横截面

Fig. 3 Enhanced-color transverse sections of icy scarps in late spring/early summer

为了进一步确证地下冰层,除了图像所能显示的特征之外,还需要确认断崖中的层状物质是否是水冰。火星勘察轨道器上还搭载了一台紧凑型火星勘测成像光谱仪(CRISM),主要用于探测和识别火星表面矿物类型。CRISM的光谱范围从可见光波段($400\sim 830\text{ nm}$)到近红外波段($830\sim 4050\text{ nm}$),空间分辨率为每像元 $15.7\sim 19.7\text{ m}$ 。利用CRISM探测数据,为确证地下冰层提供了数据支持。光谱特征表明,断崖1~3在夏季的光谱数据均表现出水冰吸收的特征(图4^[1])。



谱线从上至下分别为断崖的2、3和1以及地球实验室测量的水冰光谱。垂直虚线的位置表示水冰的吸收特征中心;波长 $1.65\text{ }\mu\text{m}$ 附近的尖峰由于仪器的影响导致。相对反射率的差异,可能由于不同区域冰层中晶粒尺寸的不同或光谱仪测量误差导致

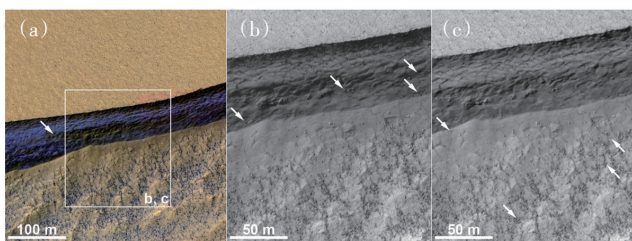
图4 CRISM获取的断崖1~3的地下冰层光谱图
Fig. 4 CRISM (The Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars) spectra of 1~3 icy scarps

根据断崖位置的光谱数据,表明这些地区暴露的蓝色物质是冰层,而非持续性的季节性霜冻。

原因在于,首先,在所有 HiRISE 图像中,地下冰层位置的颜色与断崖周围地区截然不同。在高纬度地区面向极地的陡峭坡面,存在一些季节性霜冻,但地下冰层位置的颜色,与季节性霜冻升华之后的观测图像,具有明显差异。其次,根据火星奥德赛号轨道器上的热辐射成像系统(THEMIS)的观测,断崖位置在傍晚的温度高于大气的冰点温度,可以排除断崖上的物质是大气挥发物沉降形成的。最后,在断崖下的凹陷地形中,并没有出现蓝色物质,说明这些蓝色物质并不是由于当地地形而形成的霜。

3 地下冰层如何形成

在断崖 2,科学家对比了同一地点相隔 3 个火星年的图像后发现:大小约为 1 m 的石块,其位置发生了显著变化,这是断崖退缩的有力证据(图 5^[11])。由于这些石块起源于冰层上的凸出表面,在坠落后并没有消失,因此,它们必定是嵌入到冰层中的岩石,而不是从陡峭岩石中脱落出来的碎片,也不像之前从撞击坑中溅射出来的冰块。这说明,石块位置的变动,是由于水冰升华所引起地形变化导致的。据估算,断崖上的地下冰层在每个夏季的退缩率约为几毫米。



(a) 中白色箭头是指该位置的颜色比其他区域更深;(b)、(c)为(a)白色方块区域的放大图,分别为同一位置相隔 3 个火星年前后的图像,石块从(b)中箭头的位置跌落到(c)中的位置;(b)中从左到右白色箭头指示位置处的石块,分别滚落到图(c)中从左到右白色箭头指示位置

图 5 富含水冰的断崖上石块的位置变化
Fig. 5 Blocks falling from an ice-rich scarp

综合上述特征进一步推测,这些断崖是地下冰层的起伏。虽然现在火星的自转轴倾角和地球差不多,但是资料显示:在其他行星的引力作用下,火星的自转轴倾角变化不定,最高可达 60° 以上,最低甚至低于 10° (相比之下,由于月球的稳定引力作用,地球的倾斜角

似乎只有微小的变化)^[5]。这些地下冰层形成于火星高倾角时期的降雪和霜冻,随后被压缩和再结晶,并埋藏于地下。这一观点与断崖主体的高含冰量和外观特征一致。

4 结论

在火星地下 1~2 m 的深度,就可找到纯度非常高的水冰,厚度至少可达数十米。火星上发现的这些地下冰层保存良好,不仅记录了火星过去的演化历史,也为人类登陆火星提供了基本的生命支撑物质。

火星上被侵蚀的断崖地层结构(图 6),揭示了中纬度地区距今最近的、富含冰层的垂直地质结构。断崖上的冰层可能起源于火星高倾角时期的降雪,后来经过一系列的地质过程,转变为如今的地下冰层。这些冰层最终保存在南北纬 55° 以上的表面风化层之下,或地下 1~2 m 处冷冻干燥的尘土之下。下一步,利用浅层穿透雷达进行探测,可以推测这些冰层的垂直结构。

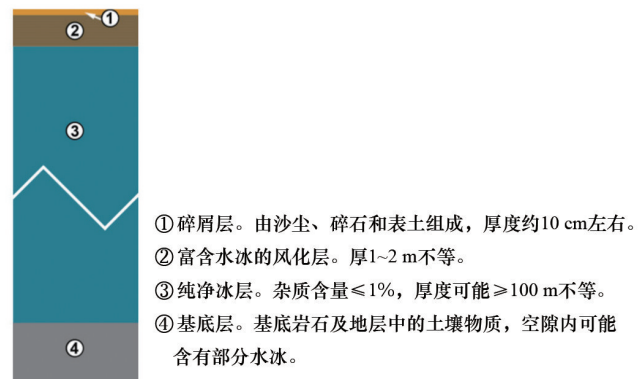


图 6 火星上被侵蚀的断崖地层结构
Fig. 6 Conceptual stratigraphy of the materials exposed in the scarps

火星断崖上发现的这些地下冰层,是在相当长的地质时期内沉积起来的,记录了过去的火星气候变化和水冰沉积的历史。之前的火星探测任务已经证明,火星曾经有过大规模的液态水,有过比现在更为温暖湿润的气候,这说明火星历史上曾经有比现在浓厚得多的二氧化碳大气层,这样才能实现火星表面有大规模液态水所要求的温室效应。但是,火星大气中巨量的二氧化碳来自哪里,后来又到哪里去了? 火星上大规模的液态水又源自何处,消失后的液态水又去哪儿了? 这些疑问,都要从地下冰层等历史沉积物中寻找

蛛丝马迹。而探索火星气候演化规律的努力,也将为了解地球气候变化提供参考。

在太阳系内,火星是人类了解最为透彻的行星,也是唯一有可能实现大规模移民的星球。根据航天科技的发展现状和各国规划,预计2030年左右,人类将实现载人登陆火星的梦想。之后,将朝着建设火星基地、改造火星、移民火星的路径逐步前行。火箭重复利用技术已经突破,新一代重型运载火箭、新一代载人飞船已经研制多年,即将成功,这些努力将使“开辟从地球到火星的廉价航线”成为可能。人类登陆火星时,将选择在离水源较近的“宜居带”,挖掘地下浅层的水冰,对它进行净化等简单处理后,变成可以直接利用的水资源。这些水源,使就地烧砖、生产辐射防护材料等火星资源原位利用成为可能,使在火星上生产食物、氧气等生命支撑物质变得更容易,从而大大降低建设火星基地的技术难度和经费代价。在中国,北京航空航天大学开展的“月宫一号”已经开展多轮试验,闭合度达到了97%,100%的氧气和水、55%的食物实现了循环再生^[6],为中国参与国际合作将来实现载人登月和登陆火星奠定基础。

人类希望移民火星(图7),并不是因为火星比地球更美好,而是因为地球上的生命曾经多次大灭绝,人类未来也将面临许多重大天文灾难。移民火星,是人类为了在太阳系中永续生存所必需付出的努力。

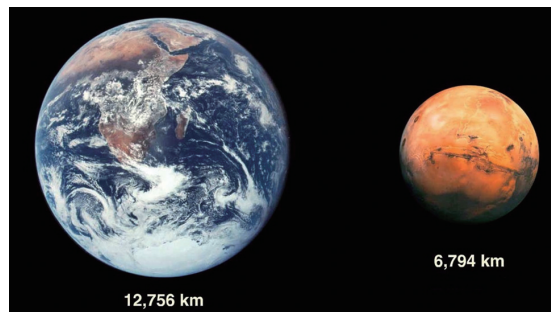


图7 地球(左)与火星(右)的
Fig. 7 Earth(left) and Mars(right)

参考文献(References)

- [1] Dundas C M, Bramson A M, Ojha L, et al. Exposed subsurface ice sheets in the Martian mid-latitudes[J]. *Science*, 2018, 359(6372): 199–201.
- [2] Mellon M T, Arvidson R E, Sizemore H G, et al. Ground ice at the Phoenix landing site: Stability state and origin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114(E1): 285–293.
- [3] Byrne S, Dundas C M, Kennedy M R, et al. Distribution of Mid-Latitude Ground Ice on Mars from New Impact Craters[J]. *Science*, 2009, 325(5948): 1674–1676.
- [4] Ojha L, Wilhelm M B, Murchie S L, et al. Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars[J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8(11): 829–832, doi:10.1038/ngeo2546.
- [5] Edwin K. The obliquity of Mars[EB/OL]. [2018-03-20]. https://hirise.lpl.arizona.edu/ESP_034132_1750.
- [6] 姚智恺.“月宫一号”牛在哪[N]. *光明日报*, 2018-01-27(8).

Discovery of underground ice layer in the scraps on Mars

ZHENG Yongchun¹, ZHAO Weifang^{1,2}

1. National Astronomical Observatories, Chinese Academy Sciences, Beijing 100101, China

2. Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract Is there water on Mars? Where is the location of the water, and how much is their storage volume? It is not only a matter of science, but also related closely to the future manned mission and immigrants to the Mars. As the most similar planet to the Earth in the solar system, the surface of Mars is covered with thick soil layer. However, what is the component beneath these sediments? It is always a mystery for human beings. Recently, scientists have discovered abundant pure water ice in the exposed scraps in the mid-latitude region. This article presented the results and what have been discovered. We discussed the proof of exposed ice in the observed material. The formation of ice scraps and the history of ice records, were also discussed. In the end, we described the utilization of the water ice resources for future Mars missions.

Keywords scarps; water ice; underground ice; spectral analysis ●



(责任编辑 王丽娜)