

# 火星盐类研究进展

孔维刚, 郑绵平

中国地质科学院矿产资源研究所; 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

**摘要** 因携带水相关地质过程及环境的丰富信息, 进而与生命起源密切相关, 行星盐类研究受到大量科研工作者的关注。好奇号登陆之后, 火星盐类研究取得了一些新进展。例如, 在着陆区泥岩中发现了黄钾铁矾; 在泥岩及泥岩砂岩的不整合接触面发现了石膏脉; 在风沉积及原位沉积岩中发现了硝酸盐。此外, 通过遥感手段, 还发现火星新出现的斜坡沟渠可能是由含高氯酸盐高浓度水冲击形成的。这些新进展再次表明了盐类对于火星科学的重要性。结合已有研究, 凝练了火星盐类研究存在的重要科学问题, 展望了中国未来火星探测研究。

**关键词** 火星; 盐类; 好奇号火星车; 地质历史

20世纪70年代, 基于海盗号探测数据, 人们推论火星存在盐类<sup>[1-2]</sup>, 这是首次通过行星探测获得行星盐类存在的证据, 也开启了行星盐类研究的新篇章。20世纪末至21世纪初, 火星探测进入爆发时代, 先后有多个轨道探测器<sup>[3-5]</sup>和着陆探测器<sup>[6-9]</sup>开展了火星探测研究, 郑绵平<sup>[10]</sup>对好奇号以外的探测器针对火星盐类的研究进行了评述。在对火星盐类研究越来越深入的同时, 深空探测器在土卫二、木卫二等多个行星地质体中分别发现了盐类存在的证据<sup>[11-12]</sup>, 行星盐类的普遍性其研究的重要性也渐为人们认识<sup>[13]</sup>。

## 1 研究方法

与地球盐类研究类似, 行星盐类研究涉及盐类矿物相、物质来源、沉积特征、次生变化及其反映的地质过程及环境信息等多个方面。在探测中, 与地质相关的载荷基本都对火星盐类研究起到了或多或少作用, 其中的绝大多数分析测试方法也是地球盐类研究的常用方法(表1)。不同的是, 暂时还不能通过采样和人类现场考察研究火星盐类。通过深入的实验室基础研究和地质类比研究, 如盐类矿物的基础物化性质研究<sup>[14]</sup>, 盐类矿物在类火星环境下的沉积演化<sup>[15]</sup>, 能够部分弥补因探测限制造成的不足。

表1 火星盐类探测相关仪器及其在火星盐类研究中的应用

Table 1 Instruments related to Mars salts explorations and their applications in Mars salt research

探测类别	对应仪器类型 <sup>[3-9]</sup>	在火星盐类研究中的作用
图像采集	着陆器: 单个固定相机(imager)、机械臂相机、立体成像双相机系统(stereo imager)、显微相机(microscopic imager)	着陆器的相机主要观测盐系矿物的结构、构造、微观沉积序列等
	轨道探测器: 低空间分辨率广角相机(wide angle camera)、高分辨率窄角相机(high resolution camera)	含盐地层的规模、宏观沉积序列、地层接触关系等
矿物学、化学成分	着陆器: 透射X射线衍射和荧光(XRD、XRF), 穆斯堡尔谱仪(mossbauer spectrometer), 热辐射红外光谱仪(thermal emission spectrometer)、气相质谱色谱(GCMS), 阿尔法粒子X射线光谱仪(APXS), 激光诱导击穿光谱仪(LIBS), 中子谱仪(NS), 化学分析套装(wet chemistry suite)	主要观测盐类矿物种类、含量, 结合图像信息进一步研究盐类矿物生成演化的环境信息, 反推地质过程
	轨道探测器: 可见近红外反射光谱仪(Vis-NIR)、热红外光谱仪(MIR)、伽马谱仪(GRS)和其中的高能中子探测器(HEND)	盐类矿物宏观分布特征, 结合地形, 地层特征研究盐类沉积演化历史, 反推火星地质过程
环境条件	着陆器: 气象观测套装(meteorological suite)	获取盐类赋存区气象数据, 用于理解盐类次生变化过程
	轨道探测器: 激光测高仪(MOLA)	用于获取盐类沉积区地貌特征及地层关系

收稿日期: 2016-10-28; 修回日期: 2017-04-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(41303049)

作者简介: 孔维刚, 副研究员, 研究方向为行星盐类矿物学、矿床学, 电子邮箱: kwg@cags.ac.cn; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学, 电子邮箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 孔维刚, 郑绵平. 火星盐类研究进展[J]. 科技导报, 2017, 35(17): 84-87; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.17.011

## 2 历史研究进展和科学问题

水是生命之源,其含义除通常理解的水是维持生命的根本,还有更重要的,水是生命起源的根本。事实上,水在类地行星演化早期的分异作用、后期的物质运输、表生等主要地质过程中都扮演着核心或关键角色。因此,无论从行星演化本身,还是从地外行星生命起源出发,水及水相关的过程都是至关重要的研究对象。从宏观角度讲,水和类地行星中其他物质相互作用(可以理解为水岩相互作用)最为普遍的无机产物主要包含黏土矿物、水合二氧化硅及盐类(水成矿物)。因此,从在火星发现开始,这些矿物就获得了大量研究者的关注。

火星表面矿物学研究较多,2014年,Ehlmann等<sup>[16]</sup>对火星表面矿物研究现状做了全面的综述,编制了火星表面水成矿物分布图,并基于陨石坑定年,给出了大致的火星水环境历史。宏观来说,诺亚纪年龄的区域多出现代表中性低盐度水溶液环境的黏土矿物,诺亚纪后期和西方纪年龄的区域多出现代表高盐度干燥环境的碳酸盐、硫酸盐、氯化物等盐类矿物,稍晚的西方纪区域还出现了代表酸性环境的铁硫酸盐矿物及水合二氧化硅。具体到盐类矿物,郑绵平等<sup>[10]</sup>对火星盐类的赋存特点做了较为详细的阐述并与地球盐类沉积进行了类比,发现与地球盐类沉积相比,既有类似性,即火星有碳酸盐—硫酸盐—氯化物—整套蒸发盐序列,又有很多不同的地方,例如相较于硫酸盐氯化物,火星地表碳酸盐数量少分布面积小,酸性硫酸盐(硫酸铁、硫酸铝等)分布较广,出现高氯酸盐等强氧化性盐类。除探测研究外,火星盐类类比研究、火星相关盐类实验室物理化学基础研究等也为理解火星历史提供了参考。

虽然对火星盐类矿物已有较多研究,但限于不能取样和载人勘察,仍有大量未解之谜。宏观上讲,火星主要盐类赋存不符合地球盐类沉积规律,碳酸盐、硫酸盐、氯化物数量并不符合传统蒸发盐盆地中3者的常规比值,如碳酸盐比例非常少,大量出现酸性硫酸盐。同时,火星全球尺度或者大尺度3种主要盐类的分布也明显不符合地球蒸发盐分布规律。氯化物并不赋存于大尺度的低洼处,3种盐类的时间乃至空间关联也较弱。局域上的问题还有,盐类与当今火星大气的相互作用及其在地表水循环中扮演的角色;火星盐类在地表的次生变化过程,盐类对火星地表环境特别是宜居性(habitability)的影响等。

## 3 最新进展

火星盐类研究新进展主要来自目前最先进的好奇号火星车的探测。好奇号火星车的设计目的是探测火星的宜居性<sup>[9]</sup>,即环境对生命起源和存留的友好性,着陆点选择在拥有巨量沉积物并位于火星赤道附近的盖尔陨石坑。好奇号从2012年8月成功着陆,从着陆点向盖尔陨石坑中心高达5 km的沉积岩的夏普峰(Mount Sharp, or Aeolis Mons)行进,对夏普峰底部进行了较多实验分析,获得了很多重要的探测成

果。2016年,Arvidson<sup>[17]</sup>较为全面介绍了好奇号针对水岩相关的探测成果,好奇号在从夏普山麓往南朝山上开进过程中,观测到河湖—三角洲相沉积环境<sup>[18-19]</sup>,分别发现了位于剖面最底部的河流相砾石层和较年轻的泥岩层,且两地层存在上覆不整合接触风成砂岩层。通过对Confidence Hill地区泥岩层位矿物学分析和化学测试,发现占比较少少的硫酸盐矿物(很可能是黄钾铁矾,见表2<sup>[20]</sup>),在泥岩和砂岩层的不整合接触处及泥岩裂隙发现了石膏脉和可能存在的石盐(矿物可能包括石膏<sup>[21]</sup>、半水石膏和硬石膏<sup>[22]</sup>,见表3<sup>[21]</sup>),这些石膏有可能是沉积后不久就结晶析出的<sup>[23]</sup>,也可能是后期孔隙水作用形成的<sup>[24]</sup>。

表2 Confidence Hill 地区泥岩矿物成分

Table 2 Mineralogy of mudstone at Confidence Hill

矿物	质量百分比/%	占晶态物质的质量百分比/%
斜长石	22.2	37.9
辉石	7.0	12.0
赤铁矿	7.8	13.4
钾长石	5.7	9.7
斜方辉石	4.4	7.5
易变辉石	3.8	6.5
磁铁矿	2.5	4.3
镁橄榄石	1.9	3.3
方石英	1.7	3.0
钛铁矿	0.9	1.6
黄钾铁矾	0.2	0.4
石英	0.4	0.6
黏土矿物	11.0	—
非晶物质	31.0	—

表3 John Klein 钻孔粉末矿物组分

Table 3 Mineralogy of John Klein drill powder

矿物	质量百分比/%	矿物	质量百分比/%
斜长石	22.4	赤铁矿	0.6
铁橄榄石	2.8	正方针铁矿	1.7
辉石	3.8	石盐	0.1
易变辉石	3.8	黄铁矿	0.3
磁铁矿	3.8	磁黄铁矿	1.1
硬石膏	2.6	蒙脱石	22.0
半水石膏	1.0	非晶物质	28.0
石英	0.4		

值得一提的是,好奇号样品分析单元(SAM)在风沉积和原生沉积岩中探测到含量高达681 mg/kg的硝酸盐矿物<sup>[25]</sup>。当前火星硝酸盐与高氯酸盐的含量比较低(<1),这一结果不太支持火星存在活跃的生物圈<sup>[26]</sup>。

除好奇号外,火星高氯酸盐研究也有新的进展。自高氯酸盐被凤凰号发现<sup>[27-28]</sup>,就受到特别关注。这一发现可以解释火星海盗号探测到的土壤的强氧化性的由来,高氯酸盐还

可以大大降低溶液的冰点,解释当前火星温度下,地表仍然有溶液活动的原因。基于火星侦察影像频谱仪(CRISM)轨道光谱数据的研究在火星中纬度地区、在新出现大量斜坡沟渠的季节探测到了高氯酸盐,喻示冲击形成斜坡沟渠的溶液含有这一成分<sup>[29]</sup>。

#### 4 结论及展望

探讨了火星盐类研究存在的问题,现总结针对这一领域科研的一些建议。

1) 火星碳酸盐疑惑及火星盐类分布的特殊性问题。与地球相比,目前探测到的火星碳酸盐分布区域有限,数量稀缺,与火星其他水成矿物如黏土、硫酸盐、氯化物等广泛分布看似矛盾。2013年,Zheng等<sup>[10]</sup>在分析类比地球火星蒸发盐分布特征后提出了碳酸盐被火星大规模酸性火山水溶解的假说。2014年,Ehlmann等<sup>[16]</sup>提出类似的两种假设,一种是水成矿物主要形成于次地表,与大气隔绝,这样可以解释碳酸盐形成少的原因;另一种解释是存留的选择性,火星地表酸性环境可以溶解碳酸盐,造成早期碳酸盐稀少的事实,并提出进一步的探测可以根据是否普遍存在黏土和少量碳酸盐共生检测这两种假说。

但地球类似的地表蒸发成盐序列不能解释火星盐类分布特征。事实上,硫酸盐氯化物形成所需的水岩相互作用不需要在地表发生,如果火星硫酸盐和氯化物是由地热水来源主导,可以比较恰当地解释火星硫酸盐氯化物盐类的分布特征,也能解释火星碳酸盐稀少这一困惑。中国未来进行的火星探测可以把解决这一重大问题作为科学目标之一。

2) 火星盐类与大气、土壤的相互作用及与环境与生命的关系。凤凰号的观测证实当今火星仍然存在至少局域的水输运和循环,在火星地质历史上相对较湿润的时期可能存在特殊意义上的全球性水圈。地球上盐类对水在地表、地下、大气的输运都有很大影响,未来的探测需进一步研究火星盐类在火星各圈层中对水活性的影响。此外,火星研究最有吸引力的话题是生命是否曾经起源,能否通过探测找到痕迹。盐类属于迁移性很大的物质,容易进入地表全球性的物质循环,而高氯酸盐及铁铝硫酸盐等强氧化性强酸性物质的发现,对火星地表生命及生命标志物的寻找提出了挑战,黏土封闭或者盐类晶格封闭的环境可能更有机会存留生命证据,这点值得未来火星探测参考。在中国,郑绵平团队自2008年在柴达木盆地开展火星类比研究工作<sup>[30]</sup>,开始了对大浪滩盐类次生变化与环境关系的研究<sup>[15,31]</sup>,之后国内同行也在该区开展火星类比研究工作<sup>[32]</sup>。该区同时拥有类火星盐类沉积和类火星环境条件,适宜开展中国火星登陆车的验证工作。

#### 参考文献(References)

[1] Clark B C, Baird A K, Rose H J, et al. Inorganic analyses of Martian surface samples at the Viking landing sites[J]. *Science*, 1976, 194(4271): 1283-1288.

[2] Clark B C, Hart D C V. The salts of Mars[J]. *Icarus*, 1981, 45(2): 370-378.

[3] Saunders R S, Arvidson R E, Badhwar G D, et al. 2001 Mars Odyssey mission summary[J]. *Space Science Review*, 2004, 110(1): 1-36.

[4] Chicarro A, Martin P, Trautner R. The Mars Express mission: An overview[J]. 2004, 1240: 3-13.

[5] Zurek R W, Smrekar S E. An overview of the Mars Reconnaissance Orbiter (MRO) science mission[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(E5): 1-5.

[6] Golombek M P, Cook R A, Economou T, et al. Overview of the Mars Pathfinder mission and assessment of landing site predictions[J]. *Science*, 1997, 278(5344): 1743-1748.

[7] Squyres S W, Arvidson R E, Baumgartner E T, et al. Athena Mars rover science investigation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(E12): 8062.

[8] Smith P H, Tamppari L, Arvidson R E, et al. Introduction to special section on the Phoenix Mission: Landing site characterization experiments, mission overviews, and expected science[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113(3): 5146-5163.

[9] Grotzinger J P, Crisp J, Vasavada A R, et al. Mars Science Laboratory mission and science investigation[J]. *Space Science Review*, 2012, 170(1/4): 5-56.

[10] Zheng M P, Kong W G, Zhang X F, et al. A comparative analysis of evaporate sediments on Earth and Mars: Implications for the climate change on Mars[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(3): 885-897.

[11] Mccord T B, Hansen G B, Fanale F P, et al. Salts on Europa's surface detected by Galileo's near infrared mapping spectrometer[J]. *Science*, 1998, 280(5367): 1242-1245.

[12] Postberg F, Kempf S, Schmidt J, et al. Sodium salts in E-ring ice grains from an ocean below the surface of Enceladus[J]. *Nature*, 2009, 459(7250): 1098-1101.

[13] 孔维刚, 郑绵平. 行星盐类研究的重要性[J]. *科技导报*, 2014, 32(35): 15-21.  
Kong Weigang, Zheng Miangping. Importance of salt studies in planetary science[J]. *Science & Technology Review*, 2014, 32(35): 15-21.

[14] Kong W G, Wang A, Chou I M. Experimental determination of the phase boundary between komelinite and pentahydrated ferric sulfate at 0.1 MPa[J]. *Chemical Geology*, 2011, 284(3): 333-338.

[15] Kong W G, Zheng M P, Kong F J, et al. Sulfate-bearing deposits at Dalangtan Playa and their implication for the formation and preservation of Martian salts[J]. *American Mineralogist*, 2014, 99(2/3): 283-290.

[16] Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the Martian surface[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2014, 42(1): 291-315.

[17] Arvidson R E. Aqueous history of Mars as inferred from landed mission measurements of rocks, soils, and water ice[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2016, 121(1): 1602-1626.

[18] Grotzinger J P, Sumner D Y, Kah L C, et al. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1242777.

[19] Grotzinger J P, Gupta S, Malin M C, et al. Deposition, exhumation, and paleoclimate of an ancient lake deposit, Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2015, 350(6257): 7575.

[20] Cavanagh P D, Bish D L, Blake D F, et al. Confidence Hills mineralogy and Chemin results from base of Mt. Sharp, Pahrump Hills, Gale

- Crater, Mars[C]/Lunar and Planetary Science Conference XLVI. Houston: LPI, 2015, 2735.
- [21] Vaniman D T, Bish D L, Ming D W, et al. Mineralogy of a mudstone at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars[J]. *Science*, 2014, 343(6169): 1243480.1–1243480.14.
- [22] Nachon S M, Clegg S M, Mangold N, et al. Calcium sulfate veins characterized by ChemCam/Curiosity at Gale Crater, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2014, 119(9): 1991–2016.
- [23] Schieber J, Bish D, Coleman M, et al. Encounters with an unearthy mudstone: Understanding the first mudstone found on Mars[J]. *Sedimentology*, 2016, Doi: 10.1111/sed.12318.
- [24] Hussain M, Warren J K. Nodular and enterolithic gypsum: The "Sabkha-tization" of Salt Flat Playa, west Texas[J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 63(1/3): 13–24.
- [25] Stern J C, Sutter B, Freissinet C, et al. Evidence for indigenous nitrogen in sedimentary and Aeolian deposits from the Curiosity rover investigations at Gale Crater, Mars[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2015, 112(14): 4245–4250.
- [26] Stern J C, Sutter B, Jackson W A, et al. The nitrate/(per)chlorate relationship on Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, doi: 10.1002/2016GL072199.
- [27] Hecht M H, Kounaves S P, Quinn R C, et al. Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix Lander site [J]. *Science*, 2009, 325(5936): 64–67.
- [28] Toner J D, Catling D C, Light B. Soluble salts at the Phoenix Lander site, Mars: A reanalysis of the Wet Chemistry Laboratory data[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, 136: 142–168.
- [29] 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.
- [30] Zheng M P, Wang A, Kong F J, et al. Saline lakes on Qinghai-Tibet Plateau and salts on Mars[C]/Lunar and Planetary Science Conference XL. Houston: LPI, 2009: 1454.
- [31] Kong F J, Kong W G, Hu B, et al. Meteorological data, surface temperature and moisture conditions at the Dalangtan Mars analogous site, in Qinghai-Tibet Plateau, China[C]/Lunar and Planetary Science Conference XLIV. Houston: LPI, 2013: 1336.
- [32] Xiao L, Wang J, Dang Y, et al. A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China)[J]. *Earth Science Reviews*, 2016, 164: 84–101.

## Progresses of studies on Mars salts

KONG Weigang, ZHENG Mianping

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments, Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, China

**Abstract** Salts carry rich information about water related geological processes and aqueous environments, and further are closely related to the origin of life, thus salts on other planets have attracted focus of numerous studies, and the study of Mars salts deserves to be one of the major science goals for future China Mars exploration. For example, jarosite has been detected from mudstone at the landing region, gypsum vein in mudstone and in the unconformable surface have confirmed by curiosity rover, and nitrates have been indicated from windblown deposits and from sedimentary rocks. In addition, perchlorate has been identified by CRISM close to the recurring slope lineae, indicating that the flow of liquid perchlorate brine may account for this recently formed surface feature. All these new findings address again the importance of salts for Mars science. Finally, we propose several key science questions about Mars salts based on current knowledge, and give some prospects for future China Mars exploration.

**Keywords** Mars; salts; Curiosity rover; geological history

(责任编辑 傅雪)