科学通报 2026 年 第 71 卷 第 18 期: 4192 ~ 4211
自然科学基金项目进展专栏 评 述
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

火星硫酸盐沉积物的全球分布与分类特征

范伊琳, 赵宇鸫*, 曹凤珂, 余晓文

成都理工大学地球与行星科学学院, 行星科学国际研究中心, 成都 610059
* 联系人, E-mail: zhaoyuyan@cdut.edu.cn

2026-01-19 收稿, 2026-05-03 修回, 2026-05-27 接受, 2026-06-01 网络版发表
国家自然科学基金(42525801, 42441803, 42373042)和天问三号任务关键技术攻关项目(TW3004)资助

摘要 火星表面广泛分布的含水硫酸盐是液态水活动历史的重要矿物记录. 硫酸盐的组成特征与形成机制对于重建火星水环境演化、理解气候转变过程及评估潜在宜居性具有重要意义. 经过多年轨道遥感与就位探测, 火星表面已识别出大量硫酸盐矿物, 但其全球分布特征、成因类型及所指示的环境过程仍缺乏系统整合与统一认识. 本文在全球尺度上系统梳理火星硫酸盐分布, 综合轨道光谱与就位探测成果, 进一步完善火星硫酸盐分布数据集, 厘清其总体分布特征, 并总结主要富集区域的空间格局与矿物学特征. 结合形成环境与主控机制, 本文将火星硫酸盐划分为蒸发沉淀型、冰雪相关型、火山热液型、成岩改造型及潜在多过程叠加型, 并对典型区域的硫酸盐类型进行了分类. 当前在硫源供给方式、形成与演化时间尺度、非晶质硫酸盐形成与保存机制、铁硫酸盐氧化还原转化过程以及水化学条件定量约束等方面仍存在诸多关键科学问题. 未来需结合高分辨率轨道遥感、就位探测、火星陨石及样品返回任务, 开展多尺度、多参数协同研究, 并加强微量样品地球化学与同位素分析方法预研, 以深化对火星硫酸盐形成与演化机制的认识, 进一步约束火星气候–水文演化过程, 并为未来火星探测任务目标制定与着陆区选择提供科学支撑.

关键词 火星, 硫酸盐, 全球分布, 分类特征, 成因机制

火星黏土矿物和水合盐类是重建古环境的重要矿物载体. 这类矿物对其形成时的地球化学环境具有明确约束意义, 为认识火星早期湿润环境及其后续演变过程提供了关键线索[1]. 硫酸盐作为火星表面广泛分布的含水矿物, 不仅记录了火星表层与次表层环境演化过程, 还具有保存生命相关信号的较高潜力[2,3]. 因此, 火星硫酸盐是研究火星水文演化历史、气候变化及环境宜居性的重要载体.

火星硫酸盐是液态水活动的重要矿物学证据, 记录了火星从早期相对湿润向后期寒冷干旱环境转变的关键过程. 研究表明, 其形成可能与蒸发浓缩、地下水活动、火山气溶胶沉降及热液作用等多种过程有关[4~8]. 然而, 硫酸盐的形成机制及硫酸根来源仍存在较大争议[9]. 现有模型主要包括地下水驱动的自下而上盐沼(playa)模式、与冰相关的自上而下化学风化模式, 以及由冻融循环驱动的混合模式[10]. 因此, 从全球尺度系统总结火星硫酸盐的分布特征并开展成因分类, 对于理解火星古气候演化及相关地质过程具有重要意义.

尽管前人已对火星多个典型区域的硫酸盐沉积开展了深入研究, 但针对火星硫酸盐全球分布格局及成因类型的系统综合仍相对不足. 为此, 本文整合已有轨道遥感与就位探测成果, 构建火星硫酸盐全球分布图, 系统分析其空间分布特征、矿物组合及成因差异, 并进一步探讨其分类规律与环境指示意义, 为火星古环境重建、宜居性评估及未来探测任务着陆区选择提供地质学依据.

引用格式: 范伊琳, 赵宇鸫, 曹凤珂, 等. 火星硫酸盐沉积物的全球分布与分类特征. 科学通报, 2026, 71: 4192–4211
Fan Y, Zhao Y Y S, Cao F, et al. Global distribution and classification of Martian sulfate deposits (in Chinese). Chin Sci Bull, 2026, 71: 4192–4211, doi: 10.1360/CSB-2026-0092

© 2026《中国科学》杂志社

1 火星硫酸盐的全球分布特征

根据火星气候演化模型, 火星在诺亚纪(Noachian)至西方纪(Hesperian)期间经历了显著的气候转变[6]. 火星奥德赛(Mars Odyssey)探测器搭载的伽马射线光谱仪(Gamma Ray Spectrometer, GRS)首次获得了火星表层(数十厘米深度内)硫元素的全球分布图(图1(a)), 显示阿拉伯台地(Arabia Terra)、水手大峡谷(Valles Marineris)及盖尔撞击坑(Gale Crater)周边存在明显的硫富集现象[9]. 随后, OMEGA(可见光及红外矿物制图光谱

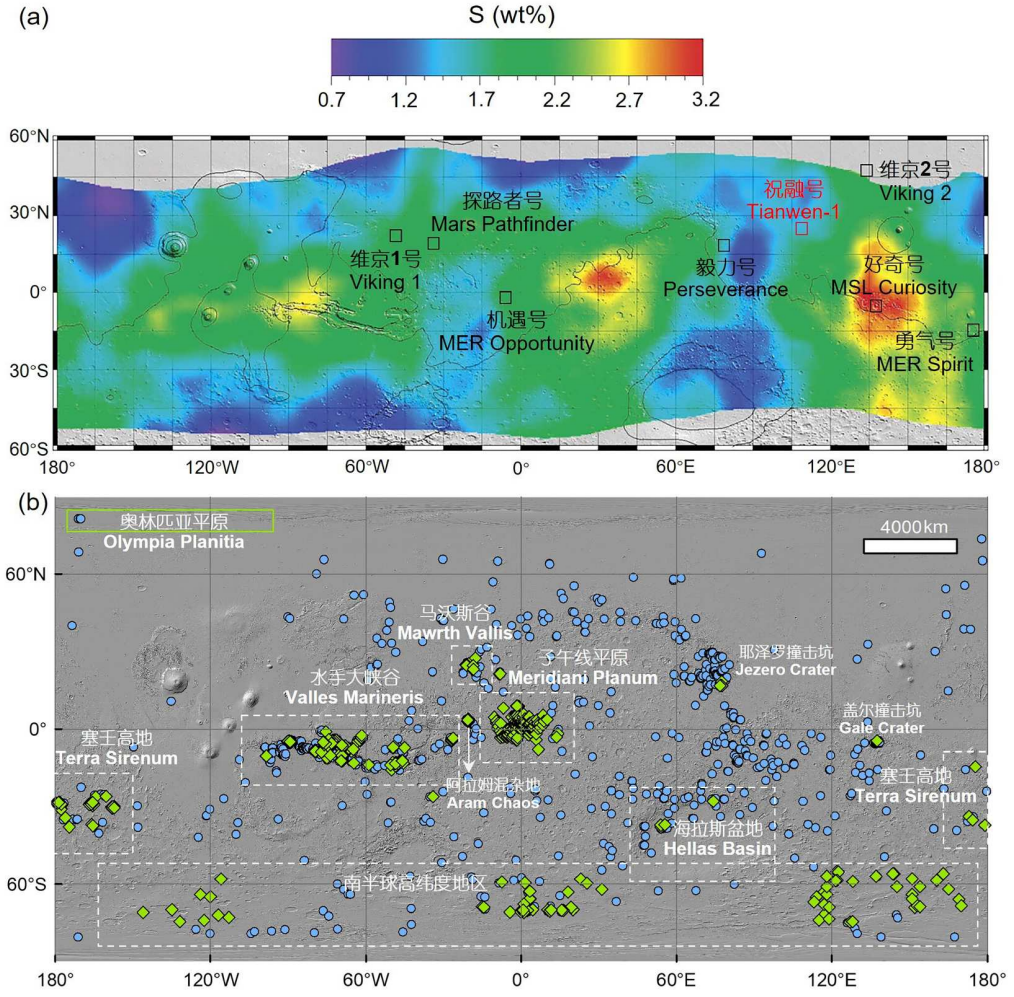


图 1 (网络版彩色)火星全球硫浓度与硫酸盐分布图. (a) 火星表面(约几十厘米深度内)硫元素平均浓度分布图. 数据来自火星奥德赛号(Mars Odyssey)搭载的伽马射线光谱仪(GRS)(改自King和McLennan[9]). 图中标注了维京号、火星探路者号、勇气号、机遇号、毅力号、好奇号及天问一号"祝融号"火星车着陆点. (b) 火星硫酸盐分布图, 底图为火星轨道激光高度计(Mars Orbiter Laser Altimeter, MOLA)地形阴影图. 绿色点为本文统计的硫酸盐分布数据, 蓝色点为Carter等人[11]建立的MOCCAS数据库中的硫酸盐分布点. 需要留意MOCCAS数据库基于自动化光谱识别结果建立, 在矿物类型判定精度及其空间分布范围约束方面仍存在一定局限性, 因此其全球尺度统计结果仍具有一定不确定性. 硫酸盐数据综合自子午线平原[11,12]、水手大峡谷[13]、塞壬高地[14]、海拉斯盆地[15]、马沃斯谷[16,17]、火星北极[18]、南半球高纬度地区[19]、盖尔撞击坑[21]及阿拉姆混杂地[22,23]

Figure 1 (Color online) Global sulfur concentration and sulfate distribution on Mars. (a) Average sulfur concentration in the upper few decimeters of the Martian surface derived from the Mars Odyssey Gamma Ray Spectrometer (GRS) (modified from King and McLennan[9]). Landing sites of Viking 1 and Viking 2, Mars Pathfinder, MER Spirit, MER Opportunity, Perseverance, Curiosity, and the Tianwen-1 Zhurong rover are shown. (b) Global distribution of sulfates on Mars overlaid on a MOLA shaded-relief basemap. Green points represent sulfate occurrences compiled in this study, whereas blue points denote sulfate occurrences from the MOCCAS database of Carter et al.[11]. It should be noted that the MOCCAS database is constructed based on automated spectral identification results, which still have certain limitations in terms of mineral-type discrimination accuracy and constraints on the true spatial extent of mineral distributions. Therefore, its global-scale statistical results remain subject to uncertainty. Sulfate occurrences are compiled from: Meridiani Planum[11,12], Valles Marineris[13], Terra Sirenum[14], Hellas Basin[15], Mawrth Vallis[16,17], the north polar region[18], southern high-latitude regions[19], Gale Crater[21] and Aram Chaos[22,23]

仪)和CRISM(火星专用小型侦察影像光谱仪)等轨道光谱数据进一步表明, 火星硫酸盐虽广泛分布, 但具有显著的区域聚集特征. 其主要集中分布于赤道及中低纬度地区, 包括子午线平原(Meridiani Planum)[11,12]、水手大峡谷[13]、赛壬高地(Terra Sirenum)[14]、海拉斯盆地(Hellas Basin)[15]、马沃斯谷(Mawrth Vallis)[16,17]、北极奥林匹亚平原(Olympia Planitia)[18]及大量撞击坑内部(图1(b)). 此外, 南半球高纬度地区也可能广泛存在硫酸盐出露[19,20]. Carter等人[11]基于OMEGA和CRISM数据建立了火星次生矿物全球数据库(MOCCAS), 显著扩展了已知硫酸盐出露范围, 并识别出大量潜在硫酸盐分布区(图1(b)). 由于该数据库基于自动化光谱识别结果, 其矿物类型判定及分布范围仍存在一定不确定性. 基于前人研究, 本文系统梳理了火星主要硫酸盐富集区及其典型矿物组合(表S1).

综合图1及表S1所示, 火星硫酸盐主要富集于赤道及中低纬度特定地质单元, 并普遍对应硫元素异常区. 然而, 硫酸盐出露范围及矿物组合与硫元素丰度分布并不完全一致, 表明其形成与保存除受控硫源控制外, 还受到局部水文条件、地形背景及后期成岩作用的共同影响. 由此可见, 火星硫酸盐并非均一分布的全球性沉积产物, 而是在不同地质时期和环境背景下形成的区域性沉积体系, 为后续开展成因分类提供了重要依据.

1.1 子午线平原(Meridiani Planum)

子午线平原是火星上最早通过OMEGA数据识别出硫酸盐的重要地区之一[24~27]. 轨道光谱显示该区广泛存在赤铁矿与硫酸盐特征吸收谱带[24,25,28,29], 相关矿物组合随后得到机遇号(Opportunity)火星车就位探测证实[30]. 穆斯堡尔谱仪(Mössbauer)识别出黄钾铁矾和赤铁矿球粒, 表明该区域曾经历酸性流体活动, 并为火星液态水存在提供了重要矿物学证据[31]. 此外, 露头中发育米级裂隙、脉体及切穿层理的多边形裂隙等构造[32]. 机遇号着陆区伯恩斯组(Burns formation)是地外发现的首个沉积岩地层, 其下部、中部和上部分别对应风成沙丘、风成薄砂层及风成薄砂层–沙丘间地沉积, 构成一套“向上变湿”的沉积序列, 记录了地下水及地表水影响逐步增强的过程[33].

根据前人研究, 子午线平原可划分为被切割的撞击坑地形(DCT)、蚀刻地形(ET)、含赤铁矿平原(Ph)和被覆盖的撞击坑地形(MCT)四个主要单元[34,35](图2(a)).

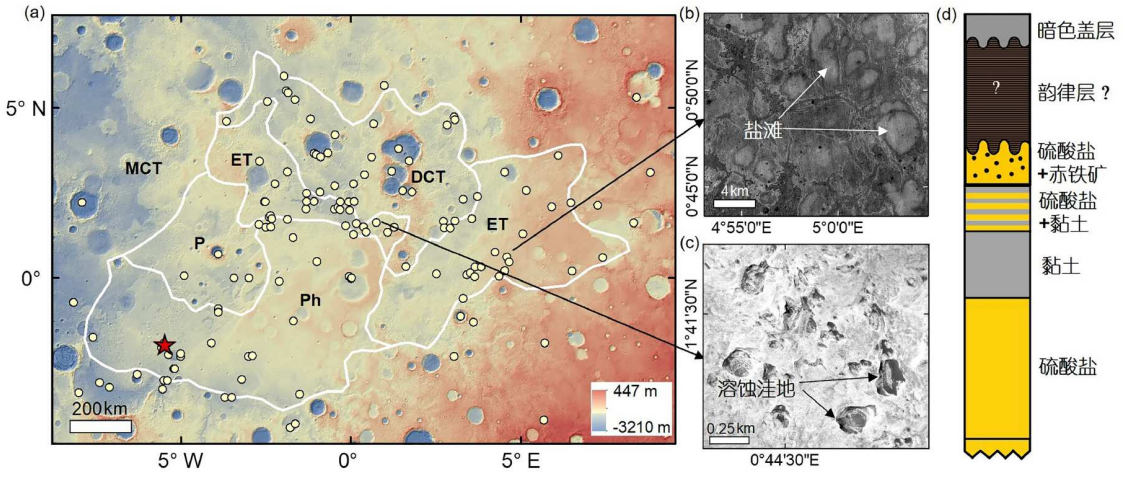


图 2 (网络版彩色)子午线平原硫酸盐分布及相关地貌特征. (a) 子午线平原地质单元与硫酸盐分布图, 底图为MOLA获取的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM). 红色星号表示机遇号着陆点. 地质单元包括被切割的撞击坑地形(DCT)、蚀刻地形(ET)、含赤铁矿平原(Ph)、被覆盖的撞击坑地形(MCT)和平原单元(P)(据Carter等人[11]修改). (b) 蚀刻地形中的盐滩(喀斯特地貌), 底图为背景相机(CTX)影像. (c) 蚀刻地形中发育的溶蚀洼地(喀斯特地貌), 底图为HiRISE影像(PSP_010222_1815). (d) 子午线平原地区综合地层剖面示意图, 显示了硫酸盐与黏土矿物的垂向分布序列. 该图为示意图, 未按比例绘制

Figure 2 (Color online) Sulfate distribution and related geomorphic features in Meridiani Planum. (a) Geologic units and sulfate distribution in Meridiani Planum. The basemap is a Digital Elevation Model (DEM) derived from MOLA. The red star marks the landing site of the Opportunity rover. Geologic units include the Dissected Cratered Terrain (DCT), Etched Terrains (ET), the hematite-bearing Plains (Ph), Mantled Cratered Terrain (MCT), and Plain Unit (P) (modified from Carter et al.[11]). (b) Salt pans (karst landforms) developed within the etched terrains, shown on a Context Camera (CTX) image. (c) Dolines (karst landforms) developed within the etched terrains, shown on a HiRISE image (PSP_010222_1815). (d) Schematic stratigraphic column of the Meridiani Planum region, illustrating the vertical distribution of sulfate and phyllosilicate minerals (not to scale)

其中, ET由浅色层状沉积物组成, 内部发育复杂风成及潜在水成地貌(如喀斯特), 并在局部识别出水镁矾($MgSO_4·H_2O$)[24~26]、多水硫酸盐(polyhydrated sulfates, PHS)及铁/镁层状硅酸盐[27,36,37]; Ph为机遇号着陆区, 主要由灰色粗晶赤铁矿、硫酸盐和玄武岩砂组成[30,38], 轨道数据表明其由赤铁矿与玄武质物质混合构成[39], 局部与含橄榄石物质共存[27]; MCT则主要表现为纳米级铁氧化物光谱特征, 部分撞击坑内发育含硫酸盐的层状沉积物[27].

硫酸盐主要富集于ET和Ph单元, 表现出明显的层位与地貌相关性. 在ET中, 多水硫酸盐广泛分布于地表、陡崖和撞击坑壁等剖面中, 而单水硫酸盐(monohydrated sulfates, MHS)主要出现在坡面底部[12,27]. 同时, 盐滩(salt pans)和溶蚀洼地(dolines)等喀斯特地貌指示了该区曾存在地表水或上涌地下水活动[40](图2(b, c)). 在Ph中, 由于表层粗晶赤铁矿覆盖, 硫酸盐主要出露于小型撞击坑坑壁及溅射物中[12,30,41], 以多水硫酸盐为主, 局部可见黄钾铁矾($KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$)、石膏($CaSO_4·2H_2O$)以及与强酸性环境相关的钙/铁硫酸盐[15].

蚀刻地形与赤铁矿平原中硫酸盐与黏土矿物共同构成一套区域性层序: 底部为富硫酸盐单元(水镁矾+多水硫酸盐), 中间为富黏土单元(富铁、铝的蒙脱石类), 顶部为富硫酸盐(含赤铁矿)单元(多水硫酸盐+黄钾铁矾、石膏)[12,37](图2(d)). 该序列与盖尔撞击坑中"硫酸盐–黏土–硫酸盐"层序高度相似, 可能共同记录了火星全球尺度表层环境由相对湿润向干旱条件演化的过程[15].

值得注意的是, 轨道光谱识别的硫酸盐分布与GRS揭示的硫富集区并不完全对应(图1). 这种差异可能与探测深度不同、表层玄武质风成砂及赤铁矿覆盖造成的光谱掩蔽、埋藏硫酸盐层的存在以及硫元素赋存形式多样等因素有关. 因此, GRS识别的高硫区并不一定对应已暴露的硫酸盐露头, 部分硫可能赋存于硫化物、非晶态含硫相或尚未识别的次生矿物之中.

1.2 水手大峡谷(Valles Marineris)

水手大峡谷内部的大型浅色层状沉积物(interior layered deposits, ILDs)广泛发育硫酸盐沉积[25]. OMEGA光谱数据识别出以水镁矾和石膏为代表的硫酸盐矿物组合[42]. 在Juventae Chasma, 石膏主要分布于层状沉积体内部, 水镁矾则多出现在其外围[42].

CRISM数据显示, Tithonium、Melas、Candor、Ophir、Coprates、Ganges、Juventae和Hebes等峡谷均发育硫酸盐或铁氧化物[13]. 硫酸盐主要富集于盆地型峡谷中亮色丘状堆积体; 在部分线性峡谷谷底亦有少量出露[13](图3(a)). 矿物组成以单水硫酸盐为主(主要为水镁矾), 其次为多水硫酸盐[13,43]. 在局部Juventae峡谷中还识别出水铁矾(szomolnokite, $FeSO_4·H_2O$)和含羟基的硫酸铁(hydroxylated ferric sulfate)[44].

CRISM填图结果表明, 各峡谷在矿物组合和层序特征上具有较高一致性: 下部地层以单水硫酸盐为主, 上部则富集多水硫酸盐. 例如, Juventae峡谷中多水硫酸盐层覆盖于单水硫酸盐层之上, 两者间具有清晰的地质界面[44]; Candor峡谷西部亦出现相似的垂向分带特征[45]. 总体上, 水镁矾普遍位于富多水硫酸盐层之下, 这一规律在厚度达数千米的层状沉积序列中均较为明显[13].

CRISM与OMEGA数据还显示, 水手大峡谷广泛发育赤铁矿, 主要分布于Tithonium、Melas、Candor、Ophir、Capri和Juventae峡谷[13,46](图3(b)). 赤铁矿主要赋存于含水镁矾的基岩中, 集中出现在下部单水硫酸盐层位, 与上部多水硫酸盐的共生关系较弱[13,47](图3(c)).

1.3 塞壬高地(Terra Sirenum)

塞壬高地位于塔尔西斯(Tharsis)火山群西南侧, 为一片诺亚纪高地. 轨道遥感显示, 该区域的次生矿物类型丰富且分布集中, 是火星上重要的蚀变矿物富集区之一. 已识别矿物包括氯盐、碳酸盐、黏土矿物、硅酸盐以及水镁矾、石膏、明矾石、黄钾铁矾等多种硫酸盐[14,48~52](图4(a)).

硫酸盐主要富集于Eridania盆地、Columbus撞击坑和Cross撞击坑(高程约–300~–1800 m). 其中, Eridania盆地和Cross撞击坑以黄钾铁矾、明矾石和多水硫酸盐为主[14,49,51,53](图4(c, d)); Columbus撞击坑则发育石膏、水镁矾、黄钾铁矾、明矾及多水硫酸盐等多种组合, 是该区矿物类型最丰富的区域[14,52,53](图4(b)).

高分辨率影像显示, 硫酸盐主要以两种形式产出: 一类为暗色覆盖层之下的脉状纹理构造, 一类为丘状地貌中的局部斑块形式出露. 例如, Ohsweken撞击坑附近坑间平原中的明矾石以及Dejnev、Cross和Ohsweken等撞击坑内覆盖在高岭石层状沉积物之上的明矾石均属于后者[14]. 相比之下, Columbus撞击坑的硫酸盐产出样式较为独特, 主要赋存于空间连续性较好、高

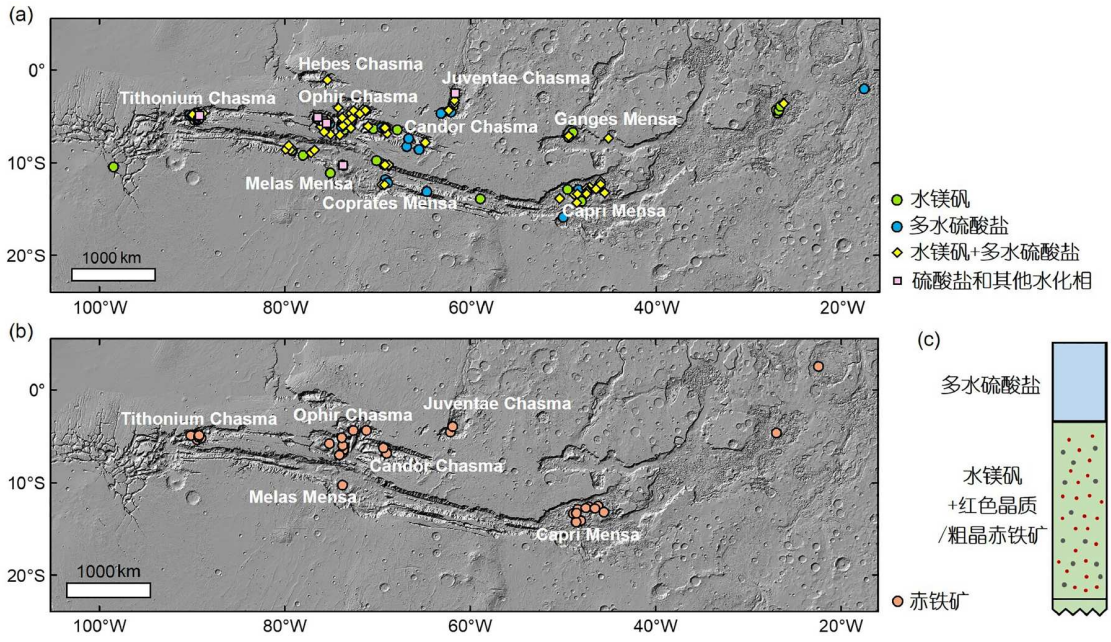


图 3 (网络版彩色)水手大峡谷硫酸盐与赤铁矿分布图. (a) 水手大峡谷单水硫酸盐与多水硫酸盐分布图(据Roach等人[13]), 底图为MOLA地形阴影图. (b) 水手大峡谷赤铁矿分布图(据Roach等人[13]), 底图同(a). (c) 水手大峡谷典型区域硫酸盐与赤铁矿地层剖面示意图. 该图为示意图, 未按比例绘制

Figure 3 (Color online) Distribution of sulfates and hematite in Valles Marineris. (a) Distribution of monohydrated and polyhydrated sulfates in Valles Marineris (modified from Roach et al.[13]), shown on a MOLA shaded-relief basemap. (b) Distribution of hematites in Valles Marineris (modified from Roach et al.[13]), with the same basemap as in (a). (c) Schematic stratigraphic column showing the distribution of sulfate and hematite units in representative areas of Valles Marineris (not to scale)

程大致稳定的破碎层内[14].

塞壬高地的硫酸盐常与黏土矿物共生. 在Columbus撞击坑中, 富铝黏土和硫酸盐主要分布于撞击坑周缘浅色环带及坑内未被后期沉积覆盖的丘状体中[14]; Cross撞击坑的铝质黏土和硫酸盐则集中于南部浅色丘状地貌内[14,49,52]; Eridania盆地则表现为铁/镁黏土基底之上局部发育多水硫酸盐及小规模黄钾铁矾、明矾斑块[14].

1.4 火星北极

火星北极地区的硫酸盐主要富集于北极石膏沙丘. OMEGA数据在约120°W、85°N处识别出一处富钙硫酸盐区域, 对应于奥林匹亚平原(Olympia Planitia)暗色纵向沙丘中的石膏富集带, 其中最高丰度区位于北极主要沙丘海东缘, 面积约为7500 km^2[18,54]. 后续研究表明, 石膏不仅分布于奥林匹亚平原沙丘, 还广泛存在于北极冰盖表面和环北极沙丘区域(Circum-Polar Dune Field)的表层沉积物中[55].

奥林匹亚平原上暗色纵向沙丘具有较其他火星沙丘更低的热惯量, 指示其由易于风力搬运的毫米级颗粒组成[56,57]. 这些沙丘被认为主要来源于极区“板状单元”(platy unit)的就地侵蚀产物, 该单元位于现今极冠层状沉积物之下, 形成时代可能早于极地冰盖[58,59].

1.5 南半球高纬度地区

火星南半球高纬度地区可能广泛发育水合硫酸盐, 整体表现为区域性分布, 并在火山和撞击构造附近局部富集(图5(a)).

矿物组成主要包括两类: 钙硫酸盐(以石膏及可能的烧石膏为主)和镁硫酸盐(以多水镁硫酸盐为主, 局部可见水镁矾等单水镁硫酸盐)[19,20]. 其中, 钙硫酸盐主要与火山活动区相关, 而镁硫酸盐分布更为广泛[19].

Sisyphi Montes是该区最重要的硫酸盐富集区之一, 发育40余个与古火山活动相关的火山体和构造[60~62]. 其硫酸盐信号以石膏为主, 主要分布于火山体及较高海拔区域[19](图5(b)). 相比之下, Thyles Rupes、Ulyxis Rupes及Chamberlin撞击坑附近的硫酸盐主要与撞击构造相关, 多见于坑壁与坑缘位置, 矿物

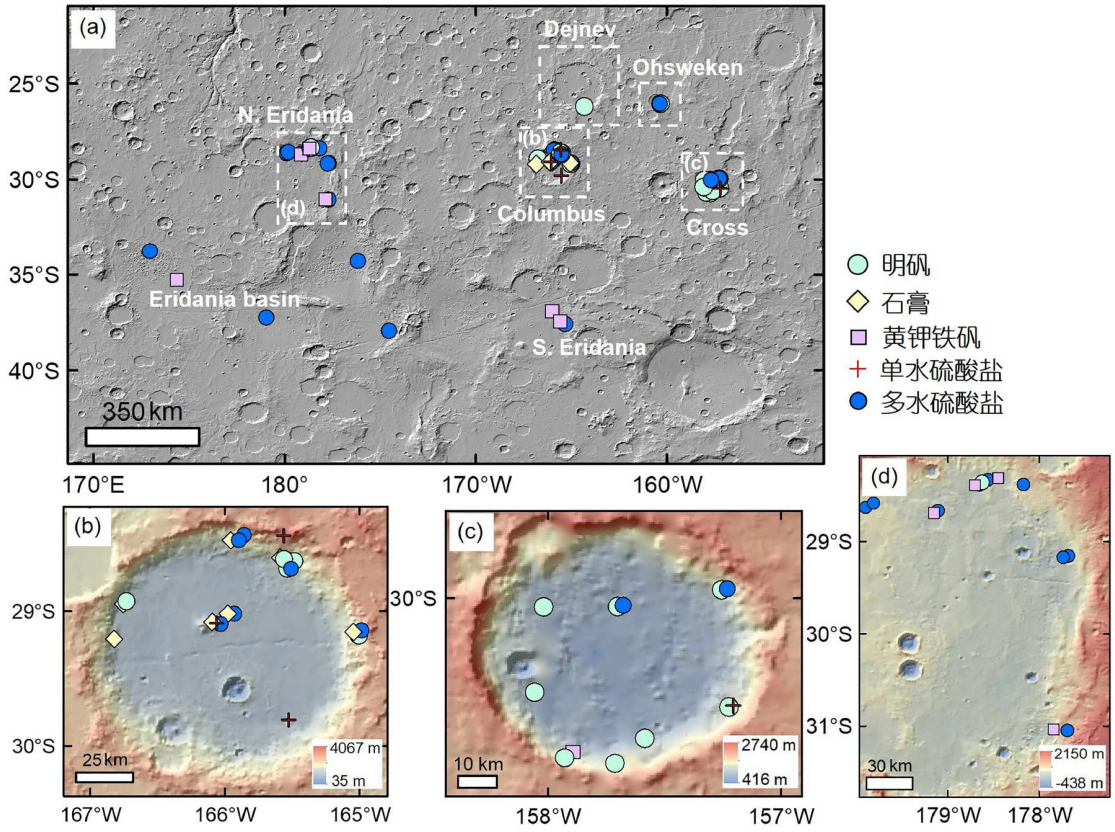


图 4 (网络版彩色)塞壬高地硫酸盐分布图. (a) 塞壬高地硫酸盐分布图. 底图为MOLA地形阴影图. (b) Columbus撞击坑、(c) Cross撞击坑及(d) Eridania盆地北部的硫酸盐分布详图, 底图为MOLA数字高程模型(DEM). 硫酸盐分布数据均据Leask等人[14]

Figure 4 (Color online) Sulfates distribution in Terra Sirenum. (a) Sulfate distribution in Terra Sirenum. The basemap is MOLA shaded relief. (b) Columbus crater, (c) Cross crater, and (d) northern Eridania basin. Detailed views of sulfate distribution shown on MOLA-DEMs. All sulfate distribution data are from Leask et al.[14]

组成更符合多水镁硫酸盐[19]. 其中, Thyles Rupes与Sisyphi Montes区域最为相似, 同时发育与火山和撞击作用相关的硫酸盐(图5(c)).

1.6 海拉斯盆地(Hellas Basin)

海拉斯盆地是火星上规模最大、保存最完整的大型撞击盆地之一, 形成于前诺亚纪或早诺亚纪时期. 盆地经历了复杂的演化, 包括千米级的沉积充填与后期侵蚀作用[63]. 盆地内部广泛发育层状地层、层状硅酸盐矿物及Terby撞击坑古三角洲等水活动证据, 表明该区经历了长期而复杂的水文演化过程[64,65].

OMEGA和CRISM数据显示, 硫酸盐主要出露于海拉斯盆地西部, 严格受到高程和地貌条件控制. 其出露高程集中于–6500~–7500 m(多数低于–7000 m), 主要赋存于“蜂窝状(honeycomb)”和“带状(banded)”地貌单元中[15](图6). 尽管其精确矿物组成尚未最终确定, 但现有光谱特征指示其以多水硫酸盐为主, 并与Terby撞击坑底部的盐类沉积具有相似性[15].

1.7 盖尔撞击坑(Gale Crater)

轨道探测表明, 盖尔撞击坑中心的夏普山(Mount Sharp)富含黏土和硫酸盐等次生矿物, 且识别出与水镁矾相符的光谱特征[25]. 好奇号(Curiosity)火星车的就位探测进一步证实了该区复杂的水岩相互作用历史. 在撞击坑内识别出大量含铁沉积岩和结晶赤铁矿[66,67], 并发现以石膏和烧石膏为主的硫酸钙岩脉[68]. 沉积岩化学组成的显著差异表明该区经历了多期次蚀变和成岩作用[69].

轨道遥感与就位探测结果均显示, 夏普山地层总体呈现出“黏土–黏土与硫酸盐过渡带–硫酸盐”的垂向分带特征. 自下向上, 矿物组合由黏土矿物占优逐渐过渡为含水硫酸盐占优[21](图7). 这一分带并非连续单调

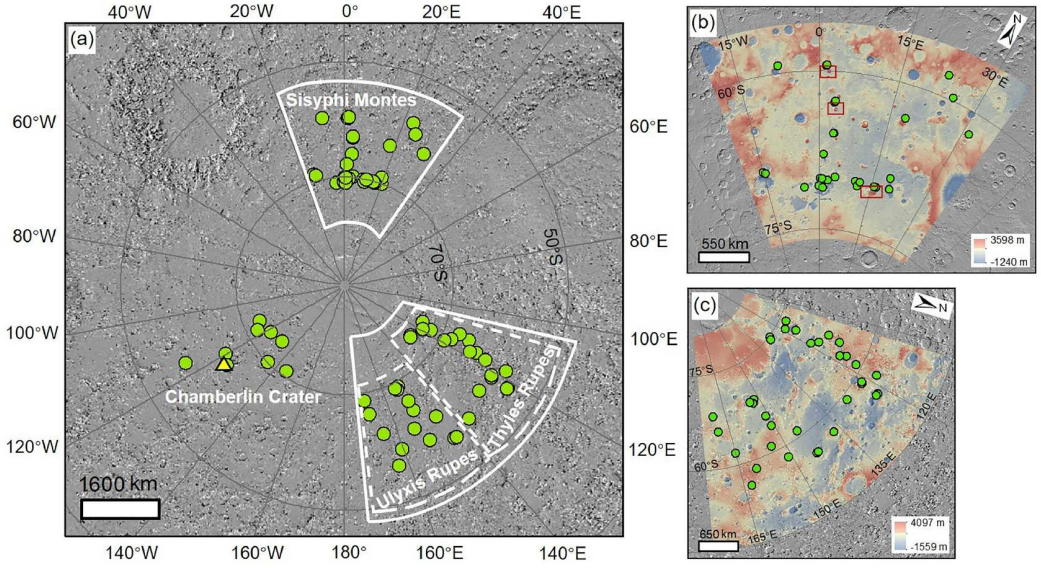


图 5 (网络版彩色)火星南半球高纬度地区硫酸盐分布图. (a) 火星南半球高纬度地区硫酸盐分布区域, 底图为MOLA地形阴影图. 黄色三角形表示Chamberlin撞击坑位置. (b) Sisyphi Montes地区硫酸盐分布图, 红色框表示火山构造. (c) Thyles Rupes和Ulyxis Rupes地区硫酸盐分布图, 底图为MOLA获取的DEM. 所有硫酸盐分布数据均据Ackiss和Wray[19]

Figure 5 (Color online) Sulfates distribution in the southern high latitudes of Mars. (a) Sulfate-bearing regions in the southern high latitudes of Mars shown on a MOLA shaded-relief basemap. The yellow triangle marks the location of Chamberlin crater. (b) Sulfates distribution in the Sisyphi Montes region; red boxes outline volcanic structures. (c) Sulfate distribution in the Thyles Rupes and Ulyxis Rupes regions shown on a MOLA-derived DEM. All sulfate distribution data are from Ackiss and Wray[19]

变化, 而表现为非均质、间断性的互层结构, 上部硫酸盐地层中仍可局部发育黏土矿物薄层[70].

好奇号的观测结果总体支持轨道遥感所揭示的矿物演化趋势, 但在"黏土–硫酸盐过渡带"中, 硫酸盐信号主要对应非晶态含硫相而不是晶质硫酸盐矿物. 火星车搭载的化学与矿物分析仪(CheMin)数据显示, Mirador组下部既未发现晶质镁硫酸盐, 也未检测到此前报道的铁硫酸盐[71,72]; 相反, 在该过渡带内发现大量非晶质硫酸盐组分, 其丰度在Mirador组底部区域性不整合面附近显著增加, 表明信号源自富含非晶质硫酸镁的成岩结核[73]. 钻取样品显示, 总SO_3量中约有20 wt%~90 wt%赋存于X射线非晶态组分中, 说明非晶态含硫相可能是火星沉积露头中硫的重要赋存形式. 这些非晶含硫相与Mg-S、Fe-S及可能的Ca-S组分有关, 推测主要对应非晶质硫酸盐或亚硫酸盐[74].

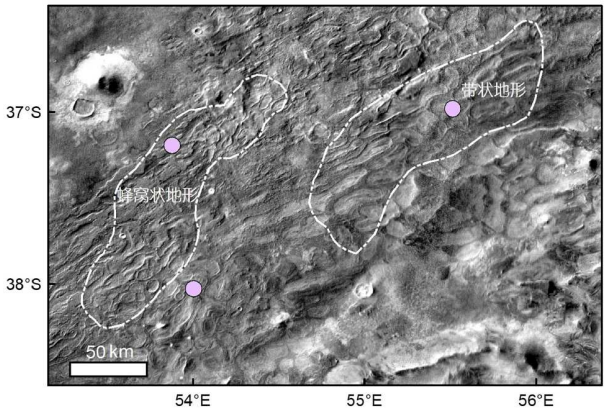


图 6 (网络版彩色)海拉斯盆地硫酸盐分布图. 底图为THEMIS日间影像, 图中标示了蜂窝状(honeycomb)和带状(banded)地形. 硫酸盐分布数据来自Carter等人[15]

Figure 6 (Color online) Sulfate distribution in Hellas Basin. The basemap is a THEMIS daytime image. Honeycomb and banded terrains are indicated. Sulfate distribution data are from Carter et al.[15]

Meyer等人[73]进一步指出, 轨道遥感定义的"黏土–硫酸盐过渡带"内发育一条低角度侵蚀不整合面(图7), 将Carolyn Shoemaker组湖相–滨湖相沉积与Mirador组下部风成沉积清晰分隔. 该界面记录了沉积环境由相对湿润(Carolyn Shoemaker组)向干旱条件(Mirador组下部)的转变, 伴随显著成岩作用. 黏土矿物主要发育于Carolyn Shoemaker组, 在Mirador组下部缺失; 相反, 非晶态镁硫酸盐结核则在不整合面处及其上部地层明显增加. 早期形成的黏土层可能作为局部流体阻隔层, 不整合面则为后期富Mg、富S流体运移提供通道, 共同促进了镁硫酸盐成岩结核的形成.

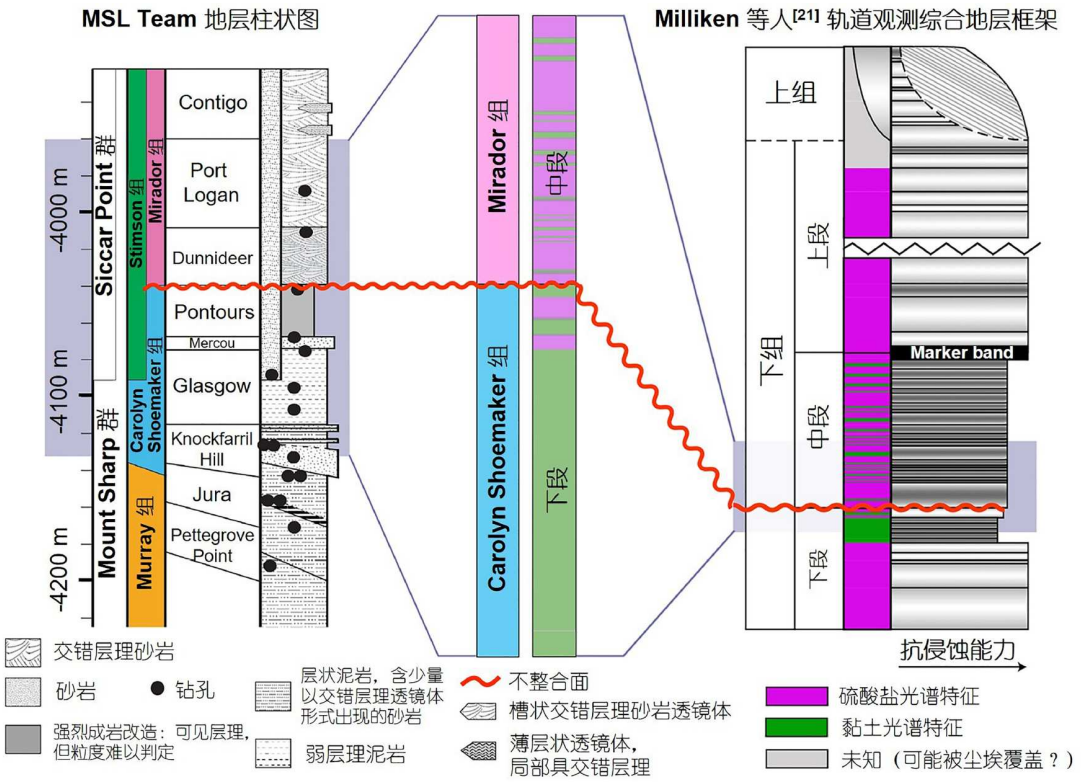


图 7 (网络版彩色)盖尔撞击坑夏普山(Mount Sharp)地层柱状图. 左侧为火星科学实验室(MSL)团队基于火星车就位观测建立的地层框架, 右侧为Milliken等人[21]基于轨道遥感数据建立的地层框架. Milliken等人[21]划分的下组内, 下段与中段之间的不整合界面, 对应于Carolyn Shoemaker组与Mirador组之间的界线. 改自Meyer等人[73]

Figure 7 (Color online) Stratigraphic columns of Mount Sharp in Gale Crater. The left column shows the stratigraphic framework established by the Mars Science Laboratory (MSL) team based on rover observations; the right column shows the prelanding orbital stratigraphic framework proposed by Milliken et al.[21]. The unconformity between the Lower and Middle members of the Lower formation defined by Milliken et al.[21] corresponds to the boundary between the Carolyn Shoemaker and Mirador formations. Adapted from Meyer et al.[73]

1.8 马沃斯谷(Mawrth Vallis)

火星马沃斯谷广泛发育层状沉积物, 是火星表面最大规模的层状硅酸盐矿物出露区之一[42]. 基于CRISM数据识别出的硫酸盐主要包括烧石膏(bassanite)、黄钾铁矾和叶绿矾等[16,17](图8(a)). 不同硫酸盐在空间分布和层位关系上具有明显差异. 烧石膏主要出露于外流河道底部, 位于黏土矿物地层之下[16]; 黄钾铁矾和叶绿矾主要分布于马沃斯谷北部, 其中叶绿矾通常出露于铝质黏土层之上[17](图8(b, c)).

总体上, 马沃斯谷硫酸盐出露规模较小且分布离散, 但矿物类型多样. 烧石膏记录了相对中性环境下的硫酸盐沉淀, 而黄钾铁矾和叶绿矾则反映了酸性蚀变过程. 硫酸盐与层状硅酸盐的空间组合关系表明, 该区经历了多阶段水–岩相互作用, 记录了复杂的水活动及水化学环境演化.

1.9 阿拉姆混杂地(Aram Chaos)

阿拉姆混杂地(约3°N, 339°E)位于Xanthe Terra地区一个形成于诺亚纪的撞击坑内部, 是火星典型的混沌地形之一[75]. 该区广泛发育层状沉积物, 并普遍出露硫酸盐矿物[23,76]. CRISM数据显示, 其主要硫酸盐类型包括单水硫酸盐、多水硫酸盐以及具有约2.236 μm吸收特征的羟基硫酸铁(ferric hydroxysulfate; $Fe^{3+}SO_4OH$)[22,23](图9(a)). 其中, 单水硫酸盐最为广泛, 主要表现为水铁矾、水镁矾及其混合类型, 而多水硫酸盐主要出露于较高层位[22].

矿物填图结果显示, 该区域硫酸盐具有垂向分带特征: 上部为多水硫酸盐, 中部为单水硫酸盐, 底部为羟基硫酸铁[22](图9(b)). 其中, 羟基硫酸铁多以斑块状分布于混杂地底部, 并位于单水硫酸盐之下. 这种层序关系表明, 阿拉姆混杂地的硫酸盐沉积在形成之后经

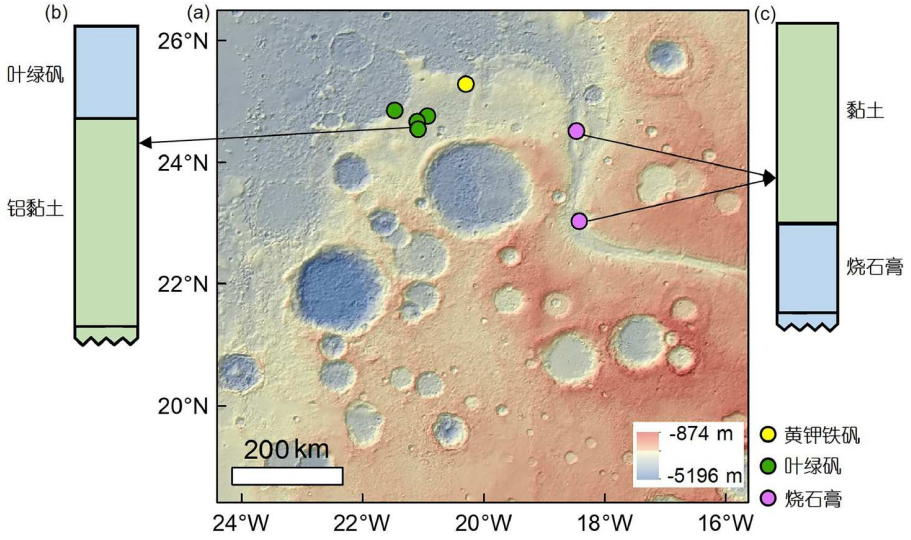


图 8 (网络版彩色)马沃斯谷硫酸盐分布图. (a) 马沃斯谷硫酸盐分布图(据Wray等人[16]和Farrand等人[17]), 底图为MOLA获取的DEM. (b) 马沃斯谷北部叶绿矾出露位置地层剖面示意图, 显示叶绿矾位于铝质黏土之上(非比例尺). (c) 马沃斯谷外流河道底部烧石膏出露位置地层剖面示意图, 显示烧石膏位于黏土层之下(非比例尺)

Figure 8 (Color online) Sulfate distribution in Mawrth Vallis. (a) Sulfate distribution in Mawrth Vallis (modified from Wray et al.[16] and Farrand et al.[17]), shown on a MOLA-derived DEM. (b) Schematic stratigraphic column of the copiapite-bearing outcrops in northern Mawrth Vallis, showing that copiapite overlying Al-rich phyllosilicate strata (not to scale). (c) Schematic stratigraphic column of the bassanite-bearing outcrops on the floor of the Mawrth Vallis outflow channel, showing that bassanite underlying clay-bearing strata (not to scale)

历了显著且复杂的后期流体改造过程[22,23,75].

1.10 其他着陆点的硫酸盐

维京号(Viking)在克里斯平原(Chryse Planitia)和乌托邦平原(Utopia Planitia)的探测结果表明, 火星细粒物

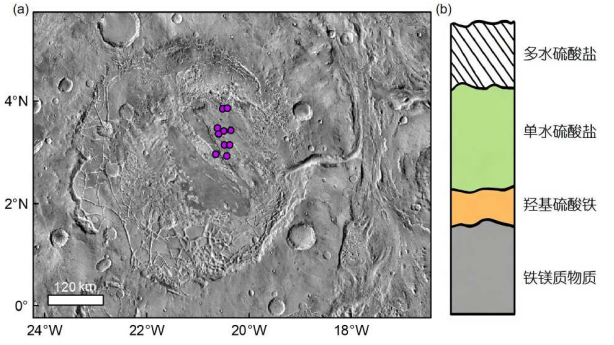


图 9 (网络版彩色)阿拉姆混杂地硫酸盐分布图. (a) 阿拉姆混杂地硫酸盐空间分布图(据Bishop等人[22]和Lichtenberg等人[23]), 底图为THEMIS日间图像. (b) 阿拉姆混杂地硫酸盐出露区地层剖面示意图, 显示羟基硫酸铁位于序列下部, 多水硫酸盐位于序列上部(非比例尺)

Figure 9 (Color online) Sulfate distribution in Aram Chaos. (a) Sulfate distribution in Aram Chaos (modified from Bishop et al.[22] and Lichtenberg et al.[23]) shown on a THEMIS daytime image. (b) Schematic stratigraphic column of sulfate-bearing units in Aram Chaos, showing ferric hydroxysulfate in the lower part of the sequence and polyhydrated sulfates in the upper part (not to scale)

质中硫含量较高, 且主要以S^{6+}形式存在, 硫与镁含量呈正相关关系[77~79]. 这些特征表明火星表层硫主要以硫酸盐形式赋存, 可能与富镁物质密切相关. 随后, 火星探路者号(Mars Pathfinder)进一步发现, 富镁–富硫物质不仅存在于土壤中, 且广泛分布于胶结物、岩石和大气尘埃中[80~82].

勇气号(Spirit)与机遇号(Opportunity)火星车就位探测进一步证实, 火星表面广泛存在硫酸盐而缺乏硫化物[83]. 其中, 古瑟夫撞击坑(Gusev Crater)富硫土壤中发育铁、镁和钙硫酸盐, 以哥伦比亚山(Columbia Hills)中的三价铁硫酸盐最具代表性[84~86]. 联合矿物学分析表明, 高铁叶绿矾(ferricopiapite, $Fe^{3+}_{4.6}(SO_4)_6(OH)_2\cdot 20H_2O$)是该区重要的铁硫酸盐矿物之一[9,85], 同时该区部分岩石中还识别出钙硫酸盐[87]. 结合针铁矿及潜在热液活动证据, 古瑟夫撞击坑可能经历了局部酸性硫酸盐蚀变和热液改造过程[86]. 凤凰号(Phoenix)则在北极着陆区土壤中检测到可溶性钙硫酸盐, 其主要矿物最可能为硬石膏(anhydrite)[88,89].

毅力号(Perseverance)火星车在耶泽罗撞击坑(Jezero Crater)识别出赋存于岩石孔隙中的可溶性硫酸盐, 不同地层单元之间矿物组合存在明显差异[90,91]. 撞击坑底部和撞击坑西缘的三角洲前缘同时发育硬石膏与

水合镁硫酸盐，而水合镁硫酸盐仅出现在上部扇体沉积单元中[91]. 这些矿物组合表明耶泽罗撞击坑曾发育多种类型的流体环境[91]. 此外, 耶泽罗撞击坑西南侧的大瑟提斯(Syrtis Major)东北部发育大规模层状硫酸盐沉积, 并以不整合方式覆盖于盆地高地之上, 主要由广泛分布的层状多水硫酸盐以及局部富集的黄钾铁矾组成[92,93]. 其矿物组成以层状多水硫酸盐和局部富集的黄钾铁矾为主，其中黄钾铁矾常发育于多边形脊状构造中[93]. Quinn和Ehlmann[93]认为，这些沉积物可能形成于深水盆地环境，并在后期经历了成岩脱水及酸性地下水活动改造.

总体而言，不同着陆区及典型沉积盆地中硫酸盐的矿物组合和赋存特征存在显著差异，反映了火星表面多样化的水活动环境及后期改造过程.

2 火星表面硫酸盐类型

火星硫酸盐广泛出露于区域性盆地沉积、风成沉积层及多种蚀变地层中，其矿物组合与层序分带关系是重建火星古水文环境与气候演化的重要依据. 轨道遥感和就位探测结果表明，硫酸盐的形成与沉积作用、火山–热液活动、风化作用与后期成岩改造密切相关[6,48,94].

硫酸盐形成需要水源(上涌地下水或地表径流)、阳离子及硫酸根共同参与，其硫来源可能包括岩石化学淋滤、火山或大气气溶胶沉降、沉积物再循环以及岩浆挥发分释放等多种途径. 现有研究普遍认为, 火星硫酸盐并非单一机制形成，而是在不同时间和空间尺度上多种地质过程共同作用的结果. 为解释其形成环境和空间分布格局、层位差异与化学组成变化，前人提出了多种成因模型. 其中，最具代表性的包括“冰风化模型”(ice-weathering model)[95]、“融雪模型”(snow-melt model)[7]和“地下水模型”(groundwater model)[4,96]. 前两者强调冰雪环境中的风化与融化过程. 在“冰风化模型”中，硫酸盐通过冰盖内部对硅酸盐质的酸性风化形成，富硫气溶胶和尘埃也封存于冰体之中；夏季时，冰中暗色颗粒吸收辐射热后可在冰–颗粒界面形成薄层水膜，从而促进化学反应进行[95]. 在“融雪模型”中，硫酸盐的形成具有季节性：由大气输送的沉积物与硫物质在融雪区内富集，通过含水胶结过程固结为硫酸盐沉积[7]，其分布常位于少数季节性融雪区内. “地下水模型”则认为硫酸盐主要形成于地下水活动及后续蒸发浓缩过程，其硫源既可来自大气沉降、原岩中硫化物(如黄铁矿等), 也可来自溶解于地下水体系中的含硫组分[4,41,96].

基于形成环境与主控过程，本文将火星硫酸盐划分为五类(图10): (1) 蒸发沉淀型; (2) 冰雪相关型; (3) 火山–热液型; (4) 成岩改造型; (5) 潜在多过程叠加型. 其中，蒸发沉淀型包括地下水和地表水参与的蒸发浓缩沉积；冰雪相关型对应融雪和冰风化过程；火山–热液型形成于火山驱动的热液系统；成岩改造型表现为沉积形成后受到流体活动和物质再分配作用的显著改造；潜在多过程叠加型则指目前尚难归因于单一机制、可能受多种过程共同控制的硫酸盐沉积，以南半球高纬度地区和马沃斯谷为代表. 鉴于部分区域硫酸盐成

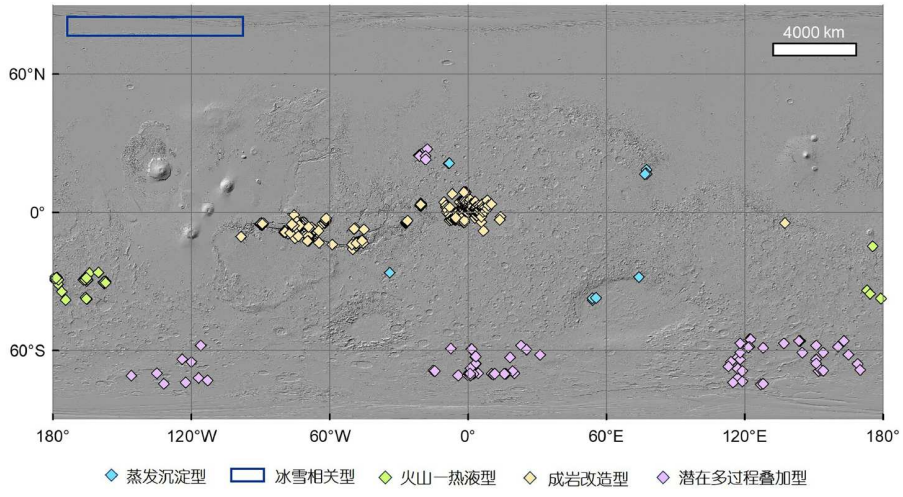


图 10 (网络版彩色)火星全球硫酸盐分类图. 底图为MOLA地形阴影图
Figure 10 (Color online) Global classification of sulfates on Mars. The basemap is a MOLA shaded-relief image

因仍存在不同解释，下文将按照主要控制过程对各类型进行讨论.

2.1 蒸发沉淀型(以Hellas Basin为代表)

海拉斯盆地(Hellas Basin)硫酸盐的形成过程可概括为“汇水–蒸发浓缩–埋藏–盐底辟”的演化序列[15]. 作为火星规模最大、地势最低的撞击盆地，海拉斯盆地在诺亚纪时期是区域水文系统的重要终端汇水区. 盆地周缘广泛发育的铁-、镁-层状硅酸盐沉积以及Terby等撞击坑保存的古湖泊与三角洲沉积，表明该区曾存在持续或间歇性的地表–地下水循环体系[64,65]. 在此过程中，高地风化产生的可溶性离子(尤其是硫酸根及其对应阳离子)不断向盆地内部输送，并在相对封闭的环境中经历蒸发浓缩, 最终形成大规模硫酸盐沉积[97]. 随后，厚度可达千米的硫酸盐沉积被密度更大的熔岩流或碎屑沉积覆盖, 形成“下轻上重”的密度结构, 从而为后期盐底辟作用提供条件. 低密度硫酸盐层发生塑性上拱侵位，控制了盆地内部硫酸盐的出露方式和空间分布[15].

海拉斯盆地广泛发育的蜂窝状地形被认为是盐底辟作用的重要证据[98~100]. 该地形普遍被解释为盐底辟顶部经后期侵蚀剥露后形成的胞格状构造. 结合低密度多水硫酸盐的分布特征及蜂窝状构造尺度推测，盆地底部可能曾发育厚度约2 km的硫酸盐层，仅在后期强烈侵蚀阶段局部出露[15,100]. 从整体演化上看，海拉斯盆地硫酸盐记录了一次或多次较大规模汇水、蒸发沉淀及后期构造改造过程，是火星蒸发沉淀型硫酸盐的典型代表[15].

2.2 冰雪相关型(以火星北极为代表)

火星北极地区发育的富石膏沙丘，其形成时期和环境均不同于火星其他典型硫酸盐沉积. 现有研究认为, 这类石膏沉积可能形成于晚亚马逊纪, 与极地层状沉积物融化产生的融水活动密切相关[18,54]. 融水进入富含硫化物和高钙辉石的沙丘后，通过水–岩相互作用释放Ca和SO_4^{2-}，在孔隙空间内经历蒸发浓缩，最终形成石膏沉积[54]. 该过程被认为与极地层状沉积物的融化及其衍生的融水活动密切相关. 源自临近水道(可能形成于极地层状沉积物周期性融化并被刻蚀的过程中)的融水渗入北极沙海的东缘，进入富含高钙辉石和硫化物的沙丘体内. 融水沿沙丘孔隙空间向下渗滤, 在局部环境中发生反复的渗流循环和蒸发浓缩作用[54].

石膏既可作为融水与沙丘中硫化物和高钙辉石原位蚀变的产物形成，也可作为孔隙流体蒸发后的沉淀矿物出现[54]. 因此, 北极地区的石膏沉积记录了一种受北极区域水源条件、沙丘物质组成以及孔隙尺度蒸发过程共同控制的特殊成因模式，其形成机制可能显著区别于火星中纬度地区地下水或蒸发盐滩主导的硫酸盐沉积体系. 近年来有研究提出, 在冰冻条件下硫酸组分可能直接蚀变玄武岩造岩矿物并形成钙硫酸盐，而无需液态水持续参与. 该机制仍有待进一步验证, 但为解释火星极地硫酸盐的形成提供了新的思路.

2.3 火山–热液型(以Terra Sirenum为代表)

结合矿物组合、地形地貌背景及空间分布特征, 塞壬高地(Terra Sirenum)的硫酸盐普遍被认为形成于火山作用驱动的地下水–热液体系[14]. 岩浆挥发分为体系提供硫酸根来源, 地下水沿断裂和构造弱面上涌, 在浅部与富含黏土矿物和火山碎屑的地层发生水–岩相互作用，形成明矾、黄钾铁矾、石膏、硬石膏及多水硫酸盐等矿物[14]. 这些硫酸盐可保存为脉状充填、丘状堆积或层状沉积，记录了火山活动与地下水循环的耦合过程. 此类热液活动既可能发生在相对温暖潮湿的时期，也可在寒冷冰冻背景下由火山热源驱动而持续进行.

塞壬高地硫酸盐主要集中在海拔–300~–1800 m的撞击坑或盆地内部，多富集于暗色盖层下方的脉状结构及丘状体中，极少与沟道等地表径流地貌直接对应[14]. 这种空间分布特征更支持地下水上涌并在近地表沉淀的热液成因模式. 从矿物组成来看, 硫酸盐类型与围岩组成存在明显对应关系：明矾主要分布于富铝黏土区域, 而黄钾铁矾则与富铁、富镁黏土共生. 这种“阳离子–围岩匹配”关系表明，上升流体在运移过程中与围岩发生了显著的物质交换，黏土层既为硫酸盐形成提供必要的阳离子来源，又在一定程度上控制了流体的流动路径[14]. Anderson等人[101]进一步提出，岩浆挥发分与上涌地下水的混合作用是硫酸根最可能的来源，这与区域内火山构造、断裂带以及暗色盖层单元的空间分布特征一致.

2.4 成岩改造型

“成岩改造型”指硫酸盐初始沉积后受到后期流体活动显著改造，导致矿物组合、层序结构及元素分布发生系统性重塑的硫酸盐类型. 其矿物学特征往往记

录了多阶段水–岩相互作用过程, 难以用单一沉积环境解释. 本文将子午线平原、水手大峡谷、盖尔撞击坑及阿拉姆混杂地等典型区域归入这一类型进行讨论.

2.4.1 子午线平原(Meridiani Planum)

子午线平原硫酸盐的成因机制目前仍存在较大争议, 主要包括地下水上涌模型、冰风化模型以及两者共同作用的混合模型[10,12,37]. 尽管不同模型对水源及形成过程的解释存在差异, 但均认为后期成岩流体活动对现今硫酸盐矿物组合和层序结构具有重要控制作用. 因此, 本文将子午线平原作为成岩改造型硫酸盐的重要代表区域之一进行讨论.

子午线平原是火星上少数可能发生显著地下水上涌与蒸发浓缩作用的区域之一[4]. 地下水在运移过程中持续淋滤溶质, 并在近地表蒸发沉淀形成厚层硫酸盐沉积; 同时, 区域发育的喀斯特地貌(图2(b, c))又表明地表水过程可能参与其中. 目前普遍认为该区硫酸盐形成受到地下水和地表水共同控制, 并经历了多阶段成岩改造. 子午线平原硫酸盐沉积的水源具有多样性特征, 区域内发育的喀斯特地貌被认为与地表水活动密切相关(图2(b, c)), 表明该区硫酸盐的形成过程应综合考虑地下水与地表水的共同作用, 并在不同酸度(pH)条件下经历多期成岩作用的叠加改造, 形成现今所观测到的硫酸盐层序(图S1).

现有矿物组合和层序关系记录了至少两期流体活动. 在诺亚纪到西方纪的过渡时期形成的大尺度风成或火山碎屑沉积基础上, 区域地下水上涌并在相对温和的化学条件(pH>4), 含硫流体与沉积物发生胶结与交代作用, 形成以下部多水硫酸盐为主的沉积单元, 并伴随顶部富铁/铝蒙脱石的黏土发育. 随后, 更酸性的晚期流体事件(pH 2~3)形成以上部黄钾铁矾、石膏和赤铁矿为特征的硫酸盐–赤铁矿矿物组合[4,12,27,30,38,41,96]. 在这一演化序列中, 区域地下水循环与局部地表水体的协同作用共同控制了硫酸盐的沉淀、再分配和长期保存[7,12,95].

地下水上涌模型和冰风化模型均能解释部分观测现象, 但各自存在局限性[10]. 地下水上涌模型为某些地貌或地形背景下的蚀变过程提供了液态水来源, 但该模型预测的火星许多潜在上涌地区并未观测到硫酸盐或相关沉积地质特征. 冰风化模型作为自上而下的冰冻风化过程, 理论上能够解释在不同海拔与地质背景下形成的“披覆状(draping)”沉积的硫酸盐, 但该模型难以解释某些岩石结构特征(例如成岩结核、孔隙充填胶结物以及次生孔隙). 因此, Liu等人[10]提出了结合地下水补给与冰风化过程的混合模型, 认为冻融循环、冻吸作用及浅层地下水活动共同促进了硫酸盐的形成与富集. 该模型大致可分为四个阶段: 含硫的酸性降水在地表沉积, 形成被氧卤化物(oxyhalogen)包覆的砂粒, 随着气温下降, 地表水在冻结过程中发生冷冻浓缩, 导致酸度与盐度升高, 从而在低温、低水量条件下仍能促进化学风化. 同时, 冻吸作用(cryosuction)驱动渗流水和含有溶解离子的地下水向上迁移, 将离子带入近地表并富集. 温度进一步下降时, 更多地下水与盐类持续上移, 形成较厚的冻结带, 其中发生橄榄石等矿物的冰冻风化并生成硫酸盐(如黄钾铁矾). 进入解冻期后, 蒸发作用促使其他硫酸盐再次沉淀, 随着冰层融化、孔隙重新连通, 富氯的未冻结水发生下渗并被淋滤, 导致氯化物与硫酸盐分离. 反复的冻融循环导致硫酸盐在近地表的富集, 并促进赤铁矿球粒的形成. 未来若能获得硫酸盐及其结晶水的S-O-H的同位素组成, 可有效判别硫的来源与氧化路径, 同时结合地下结构探测和水文模型分析, 将有助于进一步约束硫来源、水源贡献及不同成因机制的相对作用条件的约束.

2.4.2 水手大峡谷(Valles Marineris)

综合内部层状沉积物(ILDs)的矿物组合、层序关系及空间分布特征, 水手大峡谷中的硫酸盐通常被解释为经历了“初始蒸发沉积–后期成岩改造”的两阶段演化过程[13](图S2). 其中, 后期成岩流体作用对硫酸盐矿物组合和层序结构的形成具有关键控制作用.

一种被广泛接受的模型认为, ILDs最初形成于古盆地或裂谷环境中的沉积体系, 可能与地下冰融化释放的融水有关[13,75,102~104]. 地下冰融化释放的融水可能为ILDs的胶结过程及早期硫酸盐的形成提供了必要水源. ILDs的沉积与初始固结成岩作用可能早于硫酸盐的大规模富集阶段, 或可能与硫酸盐形成过程在时间上部分重叠. 随着沉积层厚度增至数千米, 其下部地层在埋藏过程中发生低温成岩作用, 促使多水硫酸盐向水镁矾转变, 同时推动铁氧化物或含铁硫酸盐(如黄钾铁矾)向赤铁矿演化[105]. 后期侵蚀作用使富含水镁矾和赤铁矿的下部层位逐渐暴露于地表. 而上部多水硫酸盐单元则可能代表原始上部未完全转化为水镁矾的残余层位或后续沉积单元.

近年来, 另一种模型提出ILDs可能形成于高倾角气候背景下, 由冰、尘埃及火山释放的酸性气溶胶共同沉降并发生低温蚀变作用形成[106]. 在富冰沉积内部,

可能形成一种强酸性、高盐度、低水岩比的局部微环境. 封存于冰中的酸性组分与尘埃颗粒发生低温蚀变反应, 形成硫酸盐、二氧化硅及部分低结晶度蚀变产物; 随着冰体升华, 仅保留富硫酸盐层沉积物, 在后期风成作用下演化为现今ILDs形态.

上述两种模式均认为ILDs的硫源主要来自火山释放的含硫挥发分, 强调水活动在硫酸盐形成中的重要作用, 但对液态水参与程度和沉积环境背景存在不同认识. 地下水上涌–蒸发沉积模型通常需要持续时间较长的液态水活动以及较大规模的物质供给过程, 而冰–尘–酸性气溶胶协同沉积模型则更适用于解释一个寒冷干旱气候背景下的硫酸盐沉积, 对火星全球硫来源总量及液态水规模的约束相对较低. 这两类模型可能分别代表水手大峡谷ILDs在不同气候阶段或不同局部环境条件下的两种端元机制. 无论初始沉积机制如何, 现有矿物地层序列普遍记录了显著的后期成岩改造过程, 因此水手大峡谷硫酸盐总体上仍属于成岩改造型沉积.

2.4.3 盖尔撞击坑(Gale Crater)

基于轨道遥感与“好奇号”火星车的综合观测, 尤其是对夏普山较高层位“黏土–硫酸盐过渡带”中非晶质硫酸盐的系统探测, Meyer等人[73]认为, 夏普山硫酸盐并非原生层状蒸发岩沉积, 而是在沉积之后经历多期流体活动形成的成岩产物(图S3). 部分非晶态含硫相可能形成于湖相沉积早期, 由输入湖盆的含硫溶液沉淀而成, 并作为胶结物参与岩石固结; 另一部分则与岩石固结后的晚期流体沿裂隙和蚀变带运移密切相关[74]. 因此, 盖尔撞击坑中硫酸盐的赋存特征主要反映长期成岩改造过程, 而非单一沉积事件, 由此归入成岩改造型硫酸盐代表.

随着好奇号探测的深入, 夏普山含硫酸盐矿物地层的水活动历史可概括为多个阶段[73]. 早期Carolyn Shoemaker组形成于相对稳定的湖泊–河流环境, 广泛发育黏土矿物; 随后进入早期成岩阶段, 浅层水和沉积物发生相互作用, 促进了黏土矿物和非晶质胶结物的沉淀, 并加强了岩石的固结程度. 随后, 湖泊系统逐渐衰退, 区域经历侵蚀作用, 在Carolyn Shoemaker组与Mirador组之间形成不整合面(图7). 此后环境逐渐转为更加干旱, Mirador组以风成沉积为主, 黏土矿物显著减少. 在Mirador组固结之后, 区域经历了多期晚期成岩流体活动. 富铁、富镁流体形成暗色结核和铁镁硫酸盐的毫米级成岩结核. 随后, 富Na-Cl流体沿裂隙运移并产生局部蚀变. 最终, 含钙、镁和硫的流体在裂隙中沉淀钙硫酸盐, 同时溶解和置换部分较浅色的镁硫酸盐结核. 这一系列流体事件表明, 水–岩相互作用持续发生于沉积之后, 较长地质时期内不断重塑夏普山硫酸盐的矿物组成与赋存状态, 因此可视为成岩改造型硫酸盐沉积的典型代表.

2.4.4 阿拉姆混杂地(Aram Chaos)

综合硫酸盐露头的地层关系及矿物分布特征, 研究认为阿拉姆混杂地硫酸盐经历了“早期地下水活动与蒸发沉积–后期热液改造”的两阶段演化过程[22,23]. 其中, 后期热液及成岩流体活动显著重塑了硫酸盐的矿物组合和层序结构. 本文将其归为成岩改造型硫酸盐沉积.

阿拉姆混杂地所在的混沌地形区通常被认为形成于地下冰融化或地下水释放所引发的灾难性地下水外流及地表塌陷事件[75,107]. 阿拉姆混杂地形成后, 持续的地下水活动及蒸发浓缩作用形成了以多水硫酸盐为主的早期沉积[23,76]. 之后逐渐形成单水硫酸盐及羟基硫酸铁[22]. 由于羟基硫酸铁通常形成于相对较高温度条件, 因此更接近热源位置, 多位于硫酸盐序列下部, 常邻近或位于单水硫酸盐层位之下; 而上部层位则保留较多未完全转化的多水硫酸盐. 后期风蚀作用进一步剥露下部层位, 使单水硫酸盐和羟基硫酸铁出露于地表[22,23,108]. 因此, 阿拉姆混杂地硫酸盐不仅记录了早期地下水补给和蒸发成盐过程, 也反映出后期热液改造对矿物组成和层序结构的重要影响.

2.5 潜在多过程叠加型

与前述几类具有相对明确环境约束的硫酸盐类型不同, 部分区域硫酸盐的形成机制仍存在多种解释或假说, 主要原因在于相关认识仍以轨道遥感观测为主, 缺乏直接的就位探测约束. 本文将其归类为“潜在多过程叠加型”, 指代可能受多种环境过程共同控制的硫酸盐沉积, 并以南半球高纬度地区和马沃斯谷(Mawrth Vallis)为代表进行讨论.

2.5.1 南半球高纬度地区

针对火星南半球高纬度地区硫酸盐, 目前主要存在两类解释: 一类强调冰风化及冰下水–岩作用过程; 另一类则认为其形成与火山热液活动及区域地下水“溶解–搬运–再沉淀”作用有关.

冰风化模型认为, 该区硫酸盐形成于冰盖覆盖环境下. 火山热源或基底热流产生的融水与基底岩石发

生水–岩相互作用, 释放SO_4^{2+}、Ca^{2+}、Mg^{2+}等离子; 随后融水在冰下水道、冰缘湖泊或封闭盆地中经历冻结–蒸发浓缩过程, 最终形成硫酸盐沉积[19,97,109]. 类似的“冰风化–蒸发”机制被用于解释火星北极石膏沙丘的形成[18,54,95]. 有研究推测, 在火星南极永久冰盖分布范围更广的时期, 南半球高纬度地区可能曾存在一个与北极类似的冰下风化系统[19]. Sisyphi Montes地区广泛发育的冰川相关地貌(例如, 蛇形丘)和火山构造为这一模型提供了支持[60,61].

另一种解释则强调火山热液作用和地下水“溶解–搬运–再沉淀”过程的共同作用. 溶解度较高的镁硫酸盐更易被区域地下水溶解并迁移至低洼处再沉淀, 溶解度较低的钙硫酸盐更倾向保留在原位或邻近高地[110]. 这一模型能够解释区域尺度上钙硫酸盐与镁硫酸盐的空间分异特征.

目前尚缺乏能够明确区分上述两类模型的关键证据, 因此南半球高纬度地区硫酸盐更可能记录了冰川作用、火山活动及地下水循环共同参与的复杂演化过程[19].

2.5.2 马沃斯谷(Mawrth Vallis)

马沃斯谷不同硫酸盐出露区在矿物组合及地层关系上表现出明显差异, 表明其形成过程并不对应单一成因模式, 更可能记录了至少两个阶段、两种不同环境条件下的演化过程[16,17].

分布于马沃斯谷外流河道底部、位于黏土层之下的烧石膏(bassanite)可能代表较早期的硫酸盐形成或富集阶段[16]. Wray等人[16]认为, 这类钙硫酸盐既可能形成于上覆黏土层沉积之前, 也可能在黏土形成过程中或之后, 由地下流体迁移和沉淀作用形成. 由于钙硫酸盐溶解度较低, 其更容易在下部层位保存, 而溶解度较高的镁/铁硫酸盐则可能被进一步搬运或在后期发生溶解与再分配.

相比之下, 马沃斯谷北部的黄钾铁矾与叶绿矾主要分布于铝质黏土层顶部或其上方, 明显晚于下部钙硫酸盐层位[17]. 这些铁硫酸盐通常被解释为后期酸性蚀变作用的产物, 可能与铁硫化物氧化及地下水活动形成的局部酸性环境有关[17].

因此, 马沃斯谷硫酸盐记录了至少两个不同阶段的演化过程: 早期以钙硫酸盐富集为特征, 晚期则以酸性铁硫酸盐形成和改造为主. 其矿物组合和层序关系反映出多种环境过程的叠加作用, 归入“潜在多过程叠加型”硫酸盐沉积的典型代表.

3 火星硫酸盐分布和分类特征对火星气候及地质演化的启示

火星表面广泛分布的含水硫酸盐是重建火星气候、水文及地质演化历史的重要矿物记录. 其空间分布、矿物组合和成因类型表明, 火星水活动并非局限于少数地区或短暂事件, 而是在不同地质时期、以多种形式持续发生的过程[2]. 因此, 火星硫酸盐不仅为恢复火星古环境提供了关键约束, 也为未来水资源勘察及未来探测任务着陆区的遴选提供了重要参考.

从区域分布格局与矿物组合特征来看, 硫酸盐与黏土矿物、铁氧化物之间普遍存在规律性的共生和转换关系. 例如, 水手大峡谷、子午线平原及盖尔撞击坑中广泛发育“黏土–硫酸盐–氧化物”矿物组合, 记录了火星表层由相对湿润、中性至弱碱性环境向后期干旱、高盐度甚至局部酸性条件演化的整体趋势. 同时, 盖尔撞击坑中大量非晶质硫酸岩及成岩结核的发现, 指示着许多轨道遥感识别的硫酸盐并非简单对应原生蒸发沉积, 而可能形成于沉积之后持续发生的流体活动和成岩改造过程[73]. 这一认识说明, 即便在整体气候持续干旱化的背景下, 局地地区仍可能长期维持地下水或孔隙流体活动. 水–岩相互作用持续时间可能远长于此前认识.

不同类型硫酸盐的形成环境进一步反映出火星水活动方式的多样性. 蒸发沉淀型硫酸盐记录了盆地尺度汇水和蒸发浓缩过程; 冰雪相关型硫酸盐指示冰盖、融水及冰下风化作用; 火山–热液型硫酸盐反映了岩浆活动与地下水循环的耦合作用; 成岩改造型硫酸盐则表明后期流体活动广泛参与并重塑了原有沉积体系. 这些类型共同说明, 火星水活动既包括早期区域性地表水和地下水系统, 包括后期局部化、间歇性的地下流体活动.

从地质演化角度看, 不同类型硫酸盐可能记录了火星不同阶段的环境变化. 大型撞击盆地中的蒸发沉淀型硫酸盐可能形成于诺亚纪至早西方纪相对稳定的区域水体环境; 子午线平原和水手大峡谷等地区的层状硫酸盐沉积则反映了西方纪时期逐渐增强的蒸发、酸化及成岩改造过程; 极区和高纬度地区的硫酸盐更可能与亚马逊纪冰相关作用有关. 整体上, 火星硫酸盐记录了水活动由早期区域性、持续性存在逐步向后期局地化、间歇性活动演化的过程, 为认识火星长期气候转型及宜居环境演化提供了重要矿物学证据.

4 结论与展望

本文系统整合了火星硫酸盐的轨道遥感与就位探测成果，总结了主要富集区域的空间分布格局及矿物组合规律, 并结合形成环境和成因机制, 建立了火星硫酸盐沉积物分类体系，为区域对比研究及约束火星气候–水文演化过程提供了基础框架. 主要结论与展望如下.

(1) 火星硫酸盐分布与类型特征. 火星硫酸盐广泛分布于赤道及中低纬度地区，包括子午线平原、水手大峡谷、赛壬高地、海拉斯盆地、马沃斯谷、北极奥林匹亚平原及多个撞击坑内部，南半球高纬度地区亦存在潜在出露. 不同区域在矿物组合、赋存方式和层序关系上表现出显著差异，反映了多样化的形成环境与演化过程. 硫酸盐与黏土矿物、铁氧化物之间普遍存在共生和转化关系，指示其形成与火星表层环境酸化和氧化过程密切相关. 本文将火星硫酸盐划分为蒸发沉淀型、冰雪相关型、火山热液型、成岩改造型和潜在多过程叠加型五类，为不同区域硫酸盐的成因解释及火星水活动环境重建提供了统一框架.

(2) 亟需解决的关键科学问题. 尽管近年来取得了大量探测成果，但火星硫酸盐研究仍面临若干关键问题: ① 硫酸根的主要来源及其供给路径尚不明确，限制了对硫酸盐形成环境及全球–局地控制机制的认识. ② 非晶质硫酸盐的形成与保存机制仍缺乏统一认识. 盖尔撞击坑等区域的研究表明，非晶质硫酸盐不仅存在于低温或少水环境，也可能与成岩作用、流体活动及特殊水化学条件有关. 这表明, 非晶质硫酸盐存在并不必然意味着长期缺乏液态水参与，其形成或保存过程可能与成岩作用、热液流体活动或特定的水化学条件密切相关. 上述认识对传统将非晶质硫酸盐简单等同于“冰冻或极少水环境产物”的观点提出了挑战，其形成机制、非晶态保存条件及其所反映的环境地球化学意义仍有待进一步厘清. ③ 火星铁硫酸盐的形成、氧化还原转化及相变演化过程仍存在较大不确定性, 特别是在低温冻融环境下，其对液态水稳定性及其他次生矿物形成的影响仍有待进一步约束. 低温冻融过程可能进一步重塑铁硫酸盐的矿物组合与结构特征, 增加成因与演化阶段判识的复杂性. 此外, 铁硫酸盐及其氧化产物在火星现代低温环境中对液态水稳定性以及其他盐类和次生矿物形成与保存的潜在调控作用仍有待系统研究.

(3) 未来探测研究方向. 未来火星硫酸盐研究需要从矿物识别进一步拓展至形成环境与演化过程的定量约束. 在轨道探测方面, 应结合高分辨率成像光谱、热红外和层序地层学分析，提高硫酸盐识别与环境判别精度; 在就位探测方面, 应加强分层钻探、微区矿物学和地球化学分析，建立矿物组合与沉积环境之间的定量联系. 火星样品返回将为解决当前关键问题提供决定性证据. 通过硫、氧、氢等同位素分析, 可约束硫来源及水循环过程; 结合微区矿物学、成岩结构和元素价态研究，可重建硫酸盐形成时的氧化还原条件和水化学环境; 同时, 高精度年代学和有机质分析将为厘定火星水活动时序及评估生命信号保存潜力提供重要依据. 鉴于未来返回样品极为有限，需提前开展面向微量、痕量样品的分析方法预研，以最大化提取科学信息.

参考文献

1 Carter J, Poulet F, Bibring J, et al. Hydrous minerals on Mars as seen by the CRISM and OMEGA imaging spectrometers: updated global view. J Geophys Res Planets, 2013, 118: 831–858

2 Ling Z C, Ju E M. Research progress in the detection and investigation of sulfates on the Martian surface (in Chinese). J Space Sci Exp, 2024, 1: 40–53 [凌宗成, 鞠恩明. 火星表面硫酸盐探测与研究进展. 空间科学与试验学报, 2024, 1: 40–53]

3 Xie Y, Huang T, Zhao J, et al. Preservation characteristics of biosignatures in sulfates and their implications for the search for life on Mars. Sci China Earth Sci, 2025, 68: 2867–2890 [谢逸豪, 黄婷, 赵健楠, 等. 硫酸盐生命信号保存特征及其对火星生命探寻的启示. 中国科学: 地球科学, 2025, 55: 2992–3017]

4 Andrews-Hanna J C, Phillips R J, Zuber M T. Meridiani Planum and the global hydrology of Mars. Nature, 2007, 446: 163–166

5 Baccolo G, Delmonte B, Niles P B, et al. Jarosite formation in deep Antarctic ice provides a window into acidic, water-limited weathering on Mars. Nat Commun, 2021, 12: 436

6 Bibring J P, Langevin Y, Mustard J F, et al. Global mineralogical and aqueous Mars history derived from OMEGA/Mars Express data. Science, 2006, 312: 400–404

7 Kite E S, Halevy I, Kahre M A, et al. Seasonal melting and the formation of sedimentary rocks on Mars, with predictions for the Gale Crater

mound. Icarus, 2013, 223: 181–210
8 Tosca N J, McLennan S M, Lindsley D H, et al. Acid-sulfate weathering of synthetic Martian basalt: the acid fog model revisited. J Geophys Res, 2004, 109: E05003
9 King P L, McLennan S M. Sulfur on Mars. Elements, 2010, 6: 107–112
10 Liu J, Michalski J R, Gao W, et al. Freeze-thaw cycles drove chemical weathering and enriched sulfates in the Burns formation at Meridiani, Mars. Sci Adv, 2024, 10: eadi1805
11 Carter J, Riu L, Poulet F, et al. A Mars orbital catalog of aqueous alteration signatures (MOCAAS). Icarus, 2023, 389: 115164
12 Flahaut J, Carter J, Poulet F, et al. Embedded clays and sulfates in Meridiani Planum, Mars. Icarus, 2015, 248: 269–288
13 Roach L H, Mustard J F, Lane M D, et al. Diagenetic hematite and sulfate assemblages in Valles Marineris. Icarus, 2010, 207: 659–674
14 Leask E K, Ehlmann B L, Dundar M M. A 2-billion-year history of water-alteration in Terra Sirenum, Mars: volcanism's influence on aluminum clay formation and chemically distinct waters forming sulfates and chlorides into the amazonian. J Geophys Res Planets, 2024, 129: e2023JE008259
15 Carter J, Ansan V, Mangold N. Was Hellas Planitia a Noachian Sea? Europl Sci Congr, 2024, 17: EPSC2024-802
16 Wray J J, Squyres S W, Roach L H, et al. Identification of the Ca-sulfate bassanite in Mawrth Vallis, Mars. Icarus, 2010, 209: 416–421
17 Farrand W H, Glotch T D, Horgan B. Detection of copiapite in the northern Mawrth Vallis region of Mars: evidence of acid sulfate alteration. Icarus, 2014, 241: 346–357
18 Langevin Y, Poulet F, Bibring J P, et al. Sulfates in the north polar region of Mars detected by OMEGA/Mars Express. Science, 2005, 307: 1584–1586
19 Ackiss S E, Wray J J. Occurrences of possible hydrated sulfates in the southern high latitudes of Mars. Icarus, 2014, 243: 311–324
20 Wray J J, Murchie S L, Squyres S W, et al. Diverse aqueous environments on ancient Mars revealed in the southern highlands. Geology, 2009, 37: 1043–1046
21 Milliken R E, Grotzinger J P, Thomson B J. Paleoclimate of Mars as captured by the stratigraphic record in Gale Crater. Geophys Res Lett, 2010, 37: L04201
22 Bishop J L, Meusburger J M, Weitz C M, et al. Characterization of ferric hydroxy sulfate on Mars and implications of the geochemical environment supporting its formation. Nat Commun, 2025, 16: 7020
23 Lichtenberg K A, Arvidson R E, Morris R V, et al. Stratigraphy of hydrated sulfates in the sedimentary deposits of Aram Chaos, Mars. J Geophys Res, 2010, 115: 2009JE003353
24 Arvidson R E, Poulet F, Bibring J P, et al. Spectral reflectance and morphologic correlations in Eastern Terra Meridiani, Mars. Science, 2005, 307: 1591–1594
25 Gendrin A, Mangold N, Bibring J P, et al. Sulfates in Martian layered terrains: the OMEGA/Mars Express view. Science, 2005, 307: 1587–1591
26 Griffes J L, Arvidson R E, Poulet F, et al. Geologic and spectral mapping of etched terrain deposits in northern Meridiani Planum. J Geophys Res, 2007, 112: E08S09
27 Poulet F, Arvidson R E, Gomez C, et al. Mineralogy of Terra Meridiani and western Arabia Terra from OMEGA/MEx and implications for their formation. Icarus, 2008, 195: 106–130
28 Christensen P R, Morris R V, Lane M D, et al. Global mapping of Martian hematite mineral deposits: remnants of water-driven processes on early Mars. J Geophys Res, 2001, 106: 23873–23885
29 Christensen P R, Bandfield J L, Clark R N, et al. Detection of crystalline hematite mineralization on Mars by the Thermal Emission Spectrometer: evidence for near-surface water. J Geophys Res, 2000, 105: 9623–9642
30 Squyres S W, Arvidson R E, Bell III J F, et al. The opportunity Rover's Athena science investigation at Meridiani Planum, Mars. Science, 2004, 306: 1698–1703
31 Klingelhöfer G, Morris R V, Bernhardt B, et al. Jarosite and hematite at Meridiani Planum from Opportunity's Mössbauer spectrometer. Science, 2004, 306: 1740–1745
32 McLennan S M, Bell III J F, Calvin W M, et al. Provenance and diagenesis of the evaporite-bearing Burns formation, Meridiani Planum, Mars. Earth Planet Sci Lett, 2005, 240: 95–121
33 Grotzinger J P, Arvidson R E, Bell III J F, et al. Stratigraphy and sedimentology of a dry to wet eolian depositional system, Burns formation, Meridiani Planum, Mars. Earth Planet Sci Lett, 2005, 240: 11–72
34 Hynek B M, Arvidson R E, Phillips R J. Geologic setting and origin of Terra Meridiani hematite deposit on Mars. J Geophys Res, 2002, 107: 5088
35 Arvidson R E, Seelos Iv F P, Deal K S, et al. Mantled and exhumed terrains in Terra Meridiani, Mars. J Geophys Res, 2003, 108: 2002JE001982
36 Poulet F, Bibring J P, Mustard J F, et al. Phyllosilicates on Mars and implications for early Martian climate. Nature, 2005, 438: 623–627
37 Wiseman S M, Arvidson R E, Morris R V, et al. Spectral and stratigraphic mapping of hydrated sulfate and phyllosilicate-bearing deposits in northern Sinus Meridiani, Mars. J Geophys Res, 2010, 115: 2009JE003354

38 Squyres S W, Knoll A H, Arvidson R E, et al. Two years at Meridiani Planum: results from the Opportunity Rover. Science, 2006, 313: 1403–1407
39 Christensen P R, Ruff S W. Formation of the hematite-bearing unit in Meridiani Planum: evidence for deposition in standing water. J Geophys Res, 2004, 109: E08003
40 Baioni D, Sgavetti M. Karst terrains as possible lithologic and stratigraphic markers in northern Sinus Meridiani, Mars. Planet Space Sci, 2013, 75: 173–181
41 Arvidson R E, Poulet F, Morris R V, et al. Nature and origin of the hematite-bearing plains of Terra Meridiani based on analyses of orbital and Mars Exploration Rover data sets. J Geophys Res, 2006, 111: 2006JE002728
42 Bibring J P, Langevin Y, Gendrin A, et al. Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations. Science, 2005, 307: 1576–1581
43 Mangold N, Gendrin A, Gondet B, et al. Spectral and geological study of the sulfate-rich region of West Candor Chasma, Mars. Icarus, 2008, 194: 519–543
44 Bishop J L, Parente M, Weitz C M, et al. Mineralogy of Juventae Chasma: sulfates in the light-toned mounds, mafic minerals in the bedrock, and hydrated silica and hydroxylated ferric sulfate on the plateau. J Geophys Res, 2009, 114: E00D09
45 Murchie S, Roach L, Seelos F, et al. Evidence for the origin of layered deposits in Candor Chasma, Mars, from mineral composition and hydrologic modeling. J Geophys Res, 2009, 114: 2009JE003343
46 Weitz C M, Lane M D, Staid M, et al. Gray hematite distribution and formation in Ophir and Candor chasmata. J Geophys Res, 2008, 113: E02016
47 Bibring J P, Arvidson R E, Gendrin A, et al. Coupled ferric oxides and sulfates on the Martian surface. Science, 2007, 317: 1206–1210
48 Ehlmann B L, Edwards C S. Mineralogy of the Martian surface. Annu Rev Earth Planet Sci, 2014, 42: 291–315
49 Ehlmann B L, Swayze G A, Milliken R E, et al. Discovery of alunite in Cross crater, Terra Sirenum, Mars: evidence for acidic, sulfurous waters. Am Miner, 2016, 101: 1527–1542
50 Osterloo M M, Anderson F S, Hamilton V E, et al. Geologic context of proposed chloride-bearing materials on Mars. J Geophys Res, 2010, 115: E10012
51 Pajola M, Rossato S, Carter J, et al. Eridania Basin: an ancient paleolake floor as the next landing site for the Mars 2020 rover. Icarus, 2016, 275: 163–182
52 Wray J J, Milliken R E, Dundas C M, et al. Columbus crater and other possible groundwater-fed paleolakes of Terra Sirenum, Mars. J Geophys Res, 2011, 116: E01001
53 Carter J, Loizeau D, Mangold N, et al. Widespread surface weathering on early Mars: a case for a warmer and wetter climate. Icarus, 2015, 248: 373–382
54 Fishbaugh K E, Poulet F, Chevrier V, et al. On the origin of gypsum in the Mars north polar region. J Geophys Res, 2007, 112: E07002
55 Massé M, Bourgeois O, Le Mouélic S, et al. Martian polar and circum-polar sulfate-bearing deposits: sublimation tills derived from the North Polar Cap. Icarus, 2010, 209: 434–451
56 Herkenhoff K E, Vasavada A R. Dark material in the polar layered deposits and dunes on Mars. J Geophys Res, 1999, 104: 16487–16500
57 Paige D A, Bachman J E, Keegan K D. Thermal and albedo mapping of the polar regions of Mars using Viking thermal mapper observations: 1. North polar region. J Geophys Res, 1994, 99: 25959–25991
58 Byrne S, Murray B C. North polar stratigraphy and the paleo-erg of Mars. J Geophys Res, 2002, 107: 5044
59 Fishbaugh K, Head III J. Origin of the Martian north polar basal unit and implications for polar geologic history. In: 35th Lunar and Planetary Science Conference. League City, Texas: Europlanet Society, 2004
60 Ghatan G J, Head III J W. Candidate subglacial volcanoes in the south polar region of Mars: morphology, morphometry, and eruption conditions. J Geophys Res, 2002, 107: 5048
61 Rodriguez J, Tanaka K. Sisyphi Montes and southwest Hellas Paterae: possible impact, cryotectonic, volcanic, and mantle tectonic processes and Hellas Basin Rings. In: Fourth International Conference on Mars Polar Science and Exploration. Houston, Texas: Lunar and Planetary Institute, 2006
62 Tanaka K L, Scott D H. Geologic map of the polar regions of Mars. U.S. Geologic Investigations Series Map 1 1802 C, 1987
63 Tanaka K L, Leonard G J. Geology and landscape evolution of the Hellas region of Mars. J Geophys Res, 1995, 100: 5407–5432
64 Ansan V, Loizeau D, Mangold N, et al. Stratigraphy, mineralogy, and origin of layered deposits inside Terby crater, Mars. Icarus, 2011, 211: 273–304
65 Wilson S A, Howard A D, Moore J M, et al. Geomorphic and stratigraphic analysis of Crater Terby and layered deposits north of Hellas basin, Mars. J Geophys Res, 2007, 112: 2006JE002830
66 Anderson D E, Ehlmann B L, Forni O, et al. Characterization of LIBS emission lines for the identification of chlorides, carbonates, and sulfates in

salt/basalt mixtures for the application to MSL ChemCam data. J Geophys Res Planets, 2017, 122: 744–770
67 L'Haridon J, Mangold N, Fraeman A A, et al. Iron mobility during diagenesis at Vera Rubin Ridge, Gale Crater, Mars. J Geophys Res Planets, 2020, 125: e2019JE006299
68 Rapin W, Meslin P Y, Maurice S, et al. Hydration state of calcium sulfates in Gale crater, Mars: identification of bassanite veins. Earth Planet Sci Lett, 2016, 452: 197–205
69 Ling Z C, Liu C Q, Bai H C, et al. Recent advances on the LIBS studies of Martian surface materials (in Chinese). Bull Mineral Petrol Geochem, 2022, 41: 92–112, 117 [凌宗成, 刘长卿, 柏红春, 等. 基于激光诱导击穿光谱技术的火星表面物质成分探测研究进展. 矿物岩石地球化学通报, 2022, 41: 92–112, 117]
70 Sheppard R Y, Milliken R E, Parente M, et al. Updated perspectives and hypotheses on the mineralogy of lower Mt. Sharp, Mars, as seen from orbit. J Geophys Res Planets, 2021, 126: e2020JE006372
71 Rampe E B, Ming D W, Blake D F, et al. Mineralogy of an ancient lacustrine mudstone succession from the Murray formation, Gale crater, Mars. Earth Planet Sci Lett, 2017, 471: 172–185
72 Rampe E B, Bristow T F, Morris R V, et al. Mineralogy of Vera Rubin Ridge from the Mars Science Laboratory CheMin instrument. J Geophys Res Planets, 2020, 125: e2019JE006306
73 Meyer M J, Milliken R E, Stack K M, et al. Geological context and significance of the clay-sulfate transition region in Mount Sharp, Gale crater, Mars: an integrated assessment based on orbiter and rover data. Geol Soc Am Bull, 2025, 137: 82–115
74 Smith R J, McLennan S M, Sutter B, et al. X-ray amorphous sulfur-bearing phases in sedimentary rocks of Gale Crater, Mars. J Geophys Res Planets, 2022, 127: e2021JE007128
75 Rodriguez J, Sasaki S, Kuzmin R, et al. Outflow channel sources, reactivation, and chaos formation, Xanthe Terra, Mars. Icarus, 2005, 175: 36–57
76 Glotch T D, Christensen P R. Geologic and mineralogic mapping of Aram Chaos: evidence for a water-rich history. J Geophys Res, 2005, 110: E09006
77 Clark B C, Baird A K, Rose Jr. H J, et al. Inorganic analyses of Martian surface samples at the Viking landing sites. Science, 1976, 194: 1283–1288
78 Clark B C, Baird A K, Weldon R J, et al. Chemical composition of Martian fines. J Geophys Res, 1982, 87: 10059–10067
79 Toulmin III P, Baird A K, Clark B C, et al. Geochemical and mineralogical interpretation of the Viking inorganic chemical results. J Geophys Res, 1977, 82: 4625–4634
80 Bell III J F, McSween Jr. H Y, Crisp J A, et al. Mineralogic and compositional properties of Martian soil and dust: results from Mars Pathfinder. J Geophys Res, 2000, 105: 1721–1755
81 McSween Jr. H Y, Keil K. Mixing relationships in the Martian regolith and the composition of globally homogeneous dust. Geochim Cosmochim Acta, 2000, 64: 2155–2166
82 Morris R V, Golden D C, Bell III J F, et al. Mineralogy, composition, and alteration of Mars Pathfinder rocks and soils: evidence from multispectral, elemental, and magnetic data on terrestrial analogue, SNC meteorite, and Pathfinder samples. J Geophys Res, 2000, 105: 1757–1817
83 Franz H B, King P L, Gaillard F. Sulfur on Mars from the atmosphere to the core. In: Filiberto J, ed. Volatiles in the Martian crust. Amsterdam: Elsevier, 2019. 119–183
84 Johnson J R, Bell III J F, Cloutis E, et al. Mineralogic constraints on sulfur-rich soils from Pancam spectra at Gusev crater, Mars. Geophys Res Lett, 2007, 34: L13202
85 Lane M D, Bishop J L, Darby Dyar M, et al. Mineralogy of the Paso Robles soils on Mars. Am Miner, 2008, 93: 728–739
86 Morris R, Ming D, Yen A, et al. Possible evidence for iron sulfates, iron sulfides, and elemental sulfur at Gusev Crater, Mars, from MER, CRISM, and analog data. In: Seventh International Conference on Mars, 2007
87 Ming D W, Mittlefehldt D W, Morris R V, et al. Geochemical and mineralogical indicators for aqueous processes in the Columbia Hills of Gusev crater, Mars. J Geophys Res, 2006, 111: E02S12
88 Golden D, Ming D, Sutter B, et al. Sulfur mineralogy at the Mars Phoenix landing site. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference, held March 23–27, 2009 in The Woodlands, Texas, abstract No. 2319
89 Kounaves S P, Hecht M H, Kapit J, et al. Soluble sulfate in the Martian soil at the Phoenix landing site. Geophys Res Lett, 2010, 37: L09201
90 Farley K A, Williford K H, Stack K M, et al. Mars 2020 mission overview. Space Sci Rev, 2020, 216: 142
91 Phua Y Y, Ehlmann B L, Siljeström S, et al. Characterizing hydrated sulfates and altered phases in Jezero Crater fan and floor geologic units with SHERLOC on Mars 2020. J Geophys Res Planets, 2024, 129: e2023JE008251
92 Ehlmann B L, Mustard J F. An *in-situ* record of major environmental transitions on early Mars at Northeast Syrtis Major. Geophys Res Lett, 2012, 39: L11202

93 Quinn D P, Ehlmann B L. The deposition and alteration history of the northeast Syrtis major layered sulfates. J Geophys Res Planets, 2019, 124: 1743–1782
94 Caswell T E, Milliken R E. Evidence for hydraulic fracturing at Gale crater, Mars: implications for burial depth of the Yellowknife Bay formation. Earth Planet Sci Lett, 2017, 468: 72–84
95 Niles P B, Michalski J. Meridiani Planum sediments on Mars formed through weathering in massive ice deposits. Nat Geosci, 2009, 2: 215–220
96 Andrews-Hanna J C, Zuber M T, Arvidson R E, et al. Early Mars hydrology: Meridiani Playa deposits and the sedimentary record of Arabia Terra. J Geophys Res, 2010, 115: 2009JE003485
97 Andrews-Hanna J C, Lewis K W. Early Mars hydrology: 2. Hydrological evolution in the Noachian and Hesperian epochs. J Geophys Res, 2011, 116: E02007
98 Bernhardt H, Reiss D, Hiesinger H, et al. The honeycomb terrain on the Hellas basin floor, Mars: a case for salt or ice diapirism. J Geophys Res Planets, 2016, 121: 714–738
99 Mangold N, Allemand P. Ductile deformation in Hellas floor: salt diapirs or crustal domes? In: Sixth International Conference on Mars, 2003
100 Weiss D K, Head J W. Salt or ice diapirism origin for the honeycomb terrain in Hellas basin, Mars?: implications for the early Martian climate. Icarus, 2017, 284: 249–263
101 Anderson R C, Dohm J M, Williams J P, et al. Unraveling the geologic and tectonic history of the Memnonia-Sirenum region of Mars: implications on the early formation of the Tharsis rise. Icarus, 2019, 332: 132–150
102 Lucchitta B K, Isbell N K, Howington-Kraus A. Topography of Valles Marineris: implications for erosional and structural history. J Geophys Res, 1994, 99: 3783–3798
103 Schultz R A. Multiple-process origin of Valles Marinaris basins and troughs, Mars. Planet Space Sci, 1998, 46: 827–834
104 Nummedal D, Prior D B. Generation of Martian chaos and channels by debris flows. Icarus, 1981, 45: 77–86
105 Golden D C, Ming D W, Morris R V, et al. Hydrothermal synthesis of hematite spherules and jarosite: implications for diagenesis and hematite spherule formation in sulfate outcrops at Meridiani Planum, Mars. Am Miner, 2008, 93: 1201–1214
106 Michalski J, Niles P B. Atmospheric origin of Martian interior layered deposits: links to climate change and the global sulfur cycle. Geology, 2012, 40: 419–422
107 Carr M H. Formation of Martian flood features by release of water from confined aquifers. J Geophys Res, 1979, 84: 2995–3007
108 Massé M, Le Mouélic S, Bourgeois O, et al. Mineralogical composition, structure, morphology, and geological history of Aram Chaos crater fill on Mars derived from OMEGA Mars Express data. J Geophys Res, 2008, 113: 2008JE003131
109 Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars Reconnaissance Orbiter (MRO). J Geophys Res, 2007, 112: E05S03
110 Zolotov M Y, Mironenko M. Massive sulfate deposits on Mars could be remobilized Noachian salts. In: 45th Lunar and Planetary Science Conference, 2014

补充材料

表S1 火星硫酸盐主要分布区域及特征
图S1 子午线平原水源示意图
图S2 水手大峡谷ILDs形成及硫酸盐富集过程的示意图
图S3 盖尔撞击坑夏普山Carolyn Shoemaker 组与Mirador组含硫酸盐成岩特征及分层情况图

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “火星硫酸盐沉积物的全球分布与分类特征”

Global distribution and classification of Martian sulfate deposits

Yilin Fan, Yu-Yan Sara Zhao*, Fengke Cao & Xiaowen Yu

Research Center for Planetary Science, College of Earth and Planetary Sciences, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China
* Corresponding author, E-mail: zhaoyuyan@cdut.edu.cn

Hydrated sulfate minerals are among the most important mineralogical records of aqueous activity on Mars, preserving critical insights into the planet's hydrologic evolution, climatic transitions, surface geochemistry, and potential habitability. Over the past two decades, orbital spectroscopy and *in situ* rover investigations have revealed widespread sulfate occurrences across a broad range of Martian geological settings, including equatorial layered deposits, impact basins, polar sediments, and altered crater terrains. Despite substantial progress in identifying individual sulfate occurrences, a comprehensive synthesis of their global distribution, mineralogical diversity, and genetic classification remains lacking. Here, we present a systematic review of sulfate deposits across Mars by integrating orbital mineralogical observations, geomorphological context, and *in situ* exploration results from multiple landing sites. Building on previous datasets, we refine and expand the currently recognized global inventory of sulfate occurrences and assess their spatial relationships with major geological provinces, topographic settings, and associated secondary mineral assemblages. Our synthesis shows that Martian sulfates are not uniformly distributed, but instead occur in regionally concentrated sedimentary or alteration systems, with major enrichments in Meridiani Planum, Valles Marineris, Terra Sirenum, Gale Crater, Hellas Basin, Mawrth Vallis, Aram Chaos, the northern polar region, and southern high-latitude terrains. These deposits display substantial mineralogical diversity, including Mg-, Fe-, and Ca-sulfates, and commonly occur in association with phyllosilicates, iron oxides, amorphous phases, and other aqueous alteration products. Based on formation environments, dominant geological processes, and post-depositional evolution, we propose a five-category genetic classification framework for Martian sulfate deposits: (1) evaporitic deposits, formed through evaporation and concentration of surface or groundwater-derived brines; (2) ice- and snow-related deposits, associated with cryogenic weathering, snowmelt, freeze-thaw cycling, or ice-mediated geochemical processes; (3) volcanic-hydrothermal deposits, generated by volcanically driven hydrothermal alteration or sulfur-rich volcanic emissions; (4) diagenetically modified deposits, in which sulfate mineralogy reflects substantial post-depositional fluid alteration, redistribution, or recrystallization; and (5) multi-process composite deposits, where multiple formation mechanisms likely interacted over time. This framework highlights that many Martian sulfate occurrences reflect complex environmental evolution rather than formation through a single geological process. Our synthesis also highlights several unresolved scientific questions, including the dominant sources and cycling pathways of sulfur on Mars, the absolute and relative timing of sulfate formation across different geological epochs, the origin and preservation of amorphous sulfur-bearing phases, the redox evolution of iron sulfates under changing environmental conditions, and the quantitative aqueous geochemical constraints required to reproduce observed mineral assemblages. In particular, distinguishing primary depositional signatures from later diagenetic overprinting remains a central challenge in interpreting sulfate-bearing stratigraphic records. Future progress will require coordinated, multi-scale investigations integrating high-resolution orbital mapping, *in situ* mineralogical and geochemical analyses, experimental simulations, Martian meteorite studies, and ultimately direct analysis of returned samples. Given the likely limited mass and heterogeneity of future sulfate-bearing returned materials, methodological advances in microscale geochemistry, isotopic analysis, and correlative mineral characterization will be essential. A more robust understanding of Martian sulfate systems will not only improve reconstructions of Martian climate and hydrologic evolution, but also strengthen interpretations of ancient habitability and inform scientific target selection for future exploration and sample return missions.

Mars, sulfate, global distribution, classification characteristics, formation mechanism

doi: 10.1360/CSB-2026-0092