柴达木盆地盐类沉积物中类脂物的分布特征及天体生物学意义

程子焯¹, 肖龙^{2*}, 王红梅³, 黄婷⁴

1. 广东财经大学地理与旅游学院, 广州 510320;

2. 中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室行星科学研究所, 武汉 430074;

3. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074;

4. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 999078

* 通讯作者, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

收稿日期: 2021-03-02; 收修改稿日期: 2021-06-02; 接受日期: 2021-07-01; 网络版发表日期: 2021-08-27

国家自然科学基金项目(批准号: 41903055)和广州市科技计划项目(编号: 202002030182)资助

摘要 地球盐类环境的类比研究是深入了解火星盐类沉积物中可能存在的生物分子的重要途径。柴达木盆地是中国开展火星类比研究的重要窗口, 文章对柴达木盆地大浪滩及察尔汗的盐类样品开展了类脂物分析, 并与前人发表的不同时期和沉积环境的蒸发盐代表性样品进行对比。结果表明, 柴达木盆地盐类样品中包含较为丰富的脂肪酸化合物, 包括正构脂肪酸、不饱和脂肪酸、支链脂肪酸以及无环类异戊二烯烷酸, 也检测到甘油二烷基甘油四醚化合物(GDGTs)和古菌醇(archaeol)化合物。微生物来源的类脂物在蒸发盐中存在明显差异分布: 相对低盐的盐类样品中, 脂肪酸的多样性更丰富、含量更高, GDGTs和archaeol化合物含量高于高盐样品, 当沉积物全部由盐类矿物构成时, 类脂物的分布明显受到限制。盐类矿物含量是造成类脂物差异分布的主控因素, archaeol化合物是地球高盐沉积物中广泛分布的生物分子。本研究为限定和综合评价火星蒸发盐中可能存在的生命痕迹提供了一种类比模式。

关键词 盐类沉积物, 类脂物, 天体生物学, 柴达木盆地, 火星

1 引言

天体生物学是研究生命在宇宙中的起源、演化和分布, 分析太阳系以及系外宜居性的学科。火星是太阳系内最有希望发现地外生命的天体, 对火星生命和宜居环境的探索一直是行星科学领域的热点(Fairén等, 2010; Westall等, 2015)。围绕寻找火星生命及生命痕迹

的科学目标, 过去几十年国际火星探测任务投放的火星轨道器、着陆器和火星车开展了一系列对火星形貌特征(Tanaka等, 2014; Kerber等, 2017)、水体(Hamilton等, 2018; Kronyak等, 2019)和盐类矿物(Osterloo等, 2008; Grotzinger等, 2014; Vaniman等, 2014)的探索。探测结果显示火星表面分布有蒸发成因的盐类矿物, 包括硫酸盐、氯盐、高氯酸盐和碳酸盐等, 它们是火

中文引用格式: 程子焯, 肖龙, 王红梅, 黄婷. 2022. 柴达木盆地盐类沉积物中类脂物的分布特征及天体生物学意义. 中国科学: 地球科学, 52(2): 356–369, doi: 10.1360/SSTe-2021-0055

英文引用格式: Cheng Z, Xiao L, Wang H, Huang T. 2022. Distribution characteristics of lipids from salt sediments in Qaidam Basin and their astrobiological significance. Science China Earth Sciences, 65(1): 156–166, <https://doi.org/10.1007/s11430-021-9812-2>

星古湖泊干涸的产物(El-Maarry等, 2013; Dang等, 2020). 这些古湖泊环境生成的盐类沉积物是探索火星生命的重要目标, 而探测的重点是其中生命的痕迹, 包括可能存在的生物成因的有机分子(Cockell等, 2016; Eigenbrode等, 2018). 由于目前还没有火星样品返回地球, 也没有人类能够到达火星进行相关实验, 在地球上进行类比研究依然是研究火星盐类沉积物中生命的主要手段.

通过微生物培养的方法, 有学者在澳大利亚的Pilbara地区、西班牙Rio Tinto地区和美国Death Valley区域的盐类沉积物中分别检测出铁氧化菌、硫氧化菌和耐盐微生物(Fernández-Remolar等, 2005; Bowen等, 2008; Schubert等, 2010), 从智利Atacama沙漠中上新世蒸发盐中也识别出古菌和细菌(Rasuk等, 2014; Fernandez等, 2016). 这些研究区域是开展火星盐类环境类比分析的典型区域, 成功培养显示出微生物对这类极端环境的适应能力. 然而, 地质体中95%左右的微生物都无法培养(柴丽红等, 2004), 其实体也较难保存, 微生物培养的手段限制了对蒸发盐中生命的系统认识. 微生物脂类则相对稳定, 他们能够保存地质体中的生物学信息. 脂类化合物被广泛应用于各种沉积物中生命特征的分析(Georgiou和Deamer, 2014; Sánchez-García等, 2018; Klenner等, 2020), 也是火星盐类中最有可能被保存下来的生命痕迹(Tan等, 2018; Williams等, 2021). 其中地质体中保存的磷脂脂肪酸的差异是微生物分类的方法之一(Gharaibeh和Voorhees, 1996), 盐类沉积物中较为丰富的异构脂肪酸表明样品所处的地质时期细菌发育, 不饱和脂肪酸一般被认为是真核藻和细菌输入的标志(康晏等, 2006; Sánchez-García等, 2018). 以类异戊二烯、甘油为骨架的古菌细胞膜脂甘油二烷基甘油四醚化合物(GDGTs)和古菌醇(archaeol)化合物与细菌脂肪酸不同, 这种膜结构能适应极端环境(Schouten等, 2013). 这类化合物对高盐环境响应异常敏感, 也能示踪地质体中古菌的出现和群落结构(Turich和Freeman, 2011; Wilhelm等, 2017). 然而, 对蒸发盐中类脂物的分布特征、不同地质时代及矿物组成等构成的沉积单元中保存的类脂物的差异仍缺乏系统研究, 这极大地限制了人们通过类比研究探索火星生命潜在的盐类介质和可能的目标生物分子.

持续的干旱、强紫外辐射和各种盐湖地貌使中国柴达木盆地受到行星科学界的广泛关注, 并在该盆地

系统开展了与火星地貌(Xiao等, 2016; Anglés和Li, 2017; Dang等, 2018)、盐类矿物(Kong等, 2018; Wang等, 2018)的类比研究, 为开展盐类沉积中的生物分子分析奠定了基础. 本文选取柴达木盆地的蒸发盐沉积物为研究对象, 探索这些盐类沉积物中水解后的总脂肪酸、古菌GDGTs和archaeol化合物的分布特征, 并与其他不同沉积特征的盐类沉积样品的结果对比, 从而为限定和综合评价火星盐类环境中潜在的生命标记物提供科学依据.

2 样品及实验

大浪滩盐湖位于柴达木盆地西北的阿尔金山下, 是柴达木盆地中上新世主要盐类沉积中心. DLT-P₃沉积剖面(38°31'N, 91°21'E)位于大浪滩西北(图1a), 为前人已整理开挖的剖面(马妮娜等, 2011). 该剖面厚275cm, 是一套在湖水多次淡化-咸化交替中沉积的黏土层和芒硝层互层明显的韵律沉积物(图1c). 铀系测年结果显示剖面底部年龄为(195.1±10)ka, 顶部年龄为(118.0±5)ka(马妮娜等, 2011). 该剖面不同层位沉积特征差异明显, 是认识蒸发盐沉积中生物分子差异分布的理想研究对象. 根据前人对DLT-P₃剖面的描述和年代标尺, 我们在该剖面中选取了11个代表性样品开展矿物学和类脂物的分析, 包括6个黏土层样品和5个芒硝层样品. 在该剖面顶部也采集了1个盐壳样品. 同时, 在大浪滩小梁山还采集了4个表层样品开展矿物学和类脂物的分析, 包括1个明亮条带区域样品和3个暗色条带区域样品(图1b). 察尔汗盐湖位于柴达木盆地中东部, 在晚更新世晚期(距今3.2万年)开始化学沉积, 距今约8000年至6000年的全新世中期温暖湿润气候期结束盐湖沉积(朱允铸等, 1994; 陈宗颜等, 2011). CEH-P₃沉积剖面(36°55'N, 95°22'E)位于察尔汗中部(图1a), 由于盐矿的开采剖面出露较好, 剖面厚660cm, 野外观察到沉积物成分均一, 主要由石盐构成(图1d). 我们在该剖面中选取了2个代表性样品开展矿物学和类脂物的分析. 为避免采样过程、前处理、测试等环节的污染, 野外样品采集时除去了表面10~30cm风化物质, 并对出露的原生地层层深挖. 采集的新鲜样品用锡箔纸严密包裹, 放入密封袋和干冰箱中, 迅速运回实验室并冷冻处理. 每个样品的样品量约500g, 以确保能够重复实验.

图1 柴达木盆地大浪滩和察尔汗盐滩采样点分布图(a)、大浪滩表层样品分布(b)、大浪滩DLT-P₃剖面(c)和察尔汗CEH-P₃剖面(d)

矿物学分析在中国地质大学(武汉)材料与化学学院完成, 测试仪器名称为德国Bruker AXS D8 Advance X射线衍射仪. 测试条件为Cu靶, Ni滤波, LynxEye位阵列探测器, 扫描范围 $5^{\circ}\sim 70^{\circ}$, 扫描时每步 $0.05s$. 环境条件温度为 $24^{\circ}C$, 湿度为36%. 矿物分析使用的软件为X-powder(Ver. 2010 PRO). 类脂物提取时, 首先将干燥后的样品研磨至100目, 称取样品约30~40g, 用二氯甲烷(DCM)与甲醇(MeOH)混合溶液DCM:MeOH(9:1, v/v) 15mL提取类脂物. 加入混合溶液后, 样品超声15min, 每个样品重复超声抽提6次. 完成萃取后将萃取物用旋转蒸发器浓缩至3mL左右, 转移到5mL的细胞瓶内. 低温水浴锅上蒸干后皂化, 配置 $1mol\ L^{-1}$ 的KOH的甲醇水溶液(5%的水)作为皂化试剂(配置30mL, 1.5mL水, 2.2g的KOH). 皂化后进行中性组分的萃取, 主要为醇和酮, GDGTs存在于此组分中. 下层组分加入适量配置好的盐酸至pH<2后进行酸性组分的萃取, 上机测试前加入14%的 $BF_3/MeOH$ 溶液进行甲酯化处理. 为防止实验过程中的污染, 实验过程中的玻璃器皿均在马

弗炉中经 $500^{\circ}C$ 灼烧6h, 镊子等实验器材都经过DCM淋洗后才使用. 每一批样品分析测试过程中都准备了空白对照, 以确保实验过程没有污染. 分离后的酸性组分经气相色谱-质谱(GC-MS)测试, 色谱条件: DB-5MS, 石英毛细管柱($60m\times 0.25mm\times 0.25\mu m$), He为载气. 脂肪酸检测限约为 $0.12ng\ \mu L^{-1}$. GDGTs经液相色谱-质谱联用仪(LC-MS)测试, GDGTs化合物检测条件: A流动相为正己烷, B流动相为正己烷: 异丙醇(9:1, v/v), 洗脱梯度为0~5min, 90%A:10%B; 5~45min, A的比例线性减至82%, 接着冲洗色谱柱并回到100% B, 该过程流速保持 $0.2mL\ min^{-1}$, 柱温箱恒温 $40^{\circ}C$ (杨欢, 2010). 化合物离子化在APCI源中进行, APCI/MS条件为雾化器压力60psi, 雾化温度 $400^{\circ}C$, 干燥气流速 $6L\ min^{-1}$, 温度 $200^{\circ}C$, 毛细管电压3500V, 电晕电流 $5\mu A$ (~3200V)(杨欢, 2010). 对离子采用的是单离子扫描模式, 扫描质核比为1304、1302、1300、1298、1296、1292、1050、1048、1046、1036、1034、1032、1022、1020、1018、653和744(杨欢, 2010). GDGTs检测限约

为 $10\text{pg } \mu\text{L}^{-1}$.

3 结果

3.1 矿物学特征

DLT-P₃剖面的矿物学分析结果与前人一致, 芒硝层基本全部由芒硝矿物构成, 黏土层以石膏、碳酸盐、黏土和碎屑矿物为主(马妮娜等, 2011). 除了样品 DLT-P₃ 200~215cm 中包含 16.5% 石膏和 79.1% 无水芒硝, 其他 4 个芒硝层样品中无水芒硝矿物含量均高于 97%. 大浪滩表层样品和察尔汗剖面样品中矿物的 X 射线粉晶衍射图谱见图 2. 通过对柴达木盆地样品进行 X 射线粉晶衍射分析, 发现大浪滩 4 个表层样品的矿物组成存在明显差异. 其中 DLT-S₂ 的主要矿物组成为石盐 51.3%、无水芒硝 45.5% 和无定形矿物 3.2%; DLT-S₄ 的主要矿物组成为石盐 79.0%、石膏 18.5% 和无定形矿物 2.5%; DLT-S₅ 的主要矿物组成为石盐 56.1%、石膏 16.7%、微斜长石 23.5% 和无定形矿物 3.7%; DLT-S₆ 的主要矿物组成为石盐 98.1% 和无定形矿物 1.9%. CEH-P₃ 剖面 2 个层位的样品由石盐矿物构成, 不同层位矿物组成一致, 石盐矿物含量均高于 98%, 这也与野外观察相符.

3.2 脂肪酸的分布特征

柴达木盆地 DLT-P₃ 剖面样品中包含较为丰富的脂肪酸化合物, 包括正构脂肪酸、不饱和脂肪酸、甲基支链(异构和反异构)脂肪酸以及以植烷酸(Ph:0)为主的无环类异戊二烯烷酸(图 3), 但 DLT-P₃ 剖面不同层位的脂肪酸含量及分布特征差异显著. 在所分析的 11 个样品中, 碳链长度大于 20 的植物来源的脂肪酸主要出现在黏土层中, 总含量为 $24.96\sim 449.22\text{ng g}^{-1}$ 沉积物干重. 不饱和脂肪酸 $n\text{C}_{18:1}$ 在芒硝层及黏土层中均有出现, 含量变化范围为 $4.94\sim 126.96\text{ng g}^{-1}$ 沉积物干重. 除了样品 DLT-P₃ 154~156cm 中未检测到甲基支链脂肪酸外, 其他 5 个黏土层中都检测到了一定浓度的异构和反异构脂肪酸(包括 i14:0、a14:0、i15:0、a15:0、i16:0、i17:0 和 a17:0), 总含量为 $11.74\sim 709.64\text{ng g}^{-1}$ 沉积物干重, 而 5 个芒硝层位样品中均未检测到甲基支链脂肪酸(图 3, 图 4). 检测到的植烷酸也主要分布在黏土层中, 含量变化范围为 $3.35\sim 1405.19\text{ng g}^{-1}$ 沉积物干重(图 3). 该剖面顶部的盐壳样品中未检测到脂肪酸化合物.

表层样品 DLT-S₅ 中检测到了 $n\text{C}_{18:1}$ 化合物, 含量为 3.23ng g^{-1} 沉积物干重, 其他 3 个大浪滩表层样品及 CEH-P₃ 剖面样品中未检测到不饱和脂肪酸、支链脂肪酸以及植烷酸(图 3). 不同样品中支链脂肪酸、植烷酸的差异分布与沉积物中盐类矿物总含量有关, 当样品的盐类矿物总含量 > 95% 时, 它们的分布明显受到限制(图 3). 虽然样品间盐类矿物类型不同, 例如 DLT-P₃ 剖面高盐层基本全为无水芒硝, CEH-P₃ 剖面高盐层由石盐矿物构成, 但这些样品中支链脂肪酸、植烷酸的缺失现象并无差异.

3.3 GDGTs 和 archaeol 化合物的分布特征

DLT-P₃ 剖面样品中检测到 GDGTs 和 archaeol 化合物, 每个样品中 archaeol 含量明显高于其他化合物, 古菌合成的 GDGT-0 次之(网络版附表 1, <http://earthcn.scichina.com>). 其他古菌来源的 iGDGTs 化合物仅出现在 3 个黏土层样品中. 细菌合成的 bGDGTs 含量较低, 总含量为 $0.05\sim 4.47\text{ng g}^{-1}$ 沉积物干重, 仅在 4 个黏土层中有明显分布(图 4, 网络版附表 1). DLT-P₃ 剖面样品中 archaeol 和 GDGT-0 含量在不同层位差异明显, 除了样品 DLT-P₃ 21~47cm, 其他所有黏土层中 archaeol 和 GDGT-0 含量明显高于芒硝层(图 4). 该剖面顶部的盐壳样品中只检测到 archaeol 和 GDGT-0, 浓度分别为 3.00ng g^{-1} 沉积物干重、 0.01ng g^{-1} 沉积物干重. 表层样品 DLT-S₅ 中检测到了 archaeol、GDGT-0 及细菌合成的 bGDGTs, 含量分别为 829.88ng g^{-1} 沉积物干重、 2.32ng g^{-1} 沉积物干重、 0.96ng g^{-1} 沉积物干重. 其他 3 个大浪滩表层样品及 CEH-P₃ 剖面样品中未检测到 GDGTs 化合物, archaeol 化合物在这些样品中均有出现, 但 archaeol 浓度明显低于 DLT-S₅, 含量变化范围为 $11.64\sim 263.87\text{ng g}^{-1}$ 沉积物干重. 同样, 当样品中盐类矿物的总含量 > 95% 时, 不管盐类矿物的类型如何, GDGTs 化合物的分布也受到限制.

4 讨论

4.1 类脂物生物来源

DLT-P₃ 剖面顶部的盐壳样品中没有检测到脂肪酸化合物, 只检测到低浓度的 archaeol 和 GDGT-0, 说明剖面中检测到的丰富的脂肪酸化合物、archaeol 和 GDGTs 化合物不大可能来自后期输入. 同时, 如果存

图2 柴达木盆地盐类沉积物样品粉晶X射线衍射图谱

(a)~(d) 大浪滩表层沉积物样品; (e)~(f) 察尔汗剖面沉积物样品。Tnd, 无水芒硝; HI, 石盐; Gp, 石膏; Mic, 微斜长石

在明显的后期输入, 剖面各芒硝层中应该出现一些黏土层特有的类脂分子。因此, DLT-P₃剖面不同层位中检测到的类脂物代表的是历史沉积环境的有机物组成。沉积物中脂肪酸有一定的生物分类学意义。碳链长度大于20的脂肪酸一般来自于植物叶蜡等成分(Xie等, 2003), 柴达木盐类样品中碳链长度大于20的脂肪酸基本出现在DLT-P₃黏土层中, 相对含量较低。不饱和脂肪酸在其他高盐沉积物中也检测到, 被认为来自真核藻和细菌的贡献(Gong和Hollander, 1997; 康晏等, 2006), DLT-S₅样品和DLT-P₃剖面黏土层位中 $nC_{18:1}$ 不饱和脂肪酸可能主要来自细菌、真核藻等低等生物。与芒硝层相比, DLT-P₃剖面黏土层位中的甲基支链脂肪酸较为丰富(图4), 表明样品所处地层细菌发育(Kaneda, 1991; Rütters等, 2002; 杨欢等, 2014)。以植烷酸为主的

无环类异戊二烯烷酸同样在中国江汉盆地等其他盐类沉积物中被检测到, 并认为是来自古菌的贡献, 尤其是产甲烷古菌与嗜盐古菌(Schouten等, 1997; 康晏等, 2006), 它们可能是DLT-P₃黏土层中无环类异戊二烯烷酸的生物来源。

产甲烷古菌在湖泊环境中广泛分布, 是盐类沉积物中GDGT-0最可能的生物来源(Blaga等, 2009; 李婧婧, 2014)。在分析柴达木盆地茶卡盐湖沉积物中古菌群落时, 也发现产甲烷古菌是沉积物中主要古菌类型(Jiang等, 2006)。盐类样品中GDGT-0明显高于其他GDGTs化合物, 因此柴达木盆地DLT-P₃剖面及表层样品DLT-S₅中检测到的GDGT-0主要来自产甲烷古菌的贡献。Archaeol化合物生物来源较为广泛, 盐湖环境中的嗜盐古菌和产甲烷古菌都能合成这类古菌二醚化合

图3 柴达木盆地样品的脂肪酸分布特征

红色代表DLT-P₃剖面黏土层; 蓝色代表DLT-P₃剖面芒硝层, 盐类矿物总含量均>95%; 绿色代表大浪滩表层沉积物及CEH-P₃剖面样品, 其中 DLT-S₅盐类矿物总含量为72.8%, 其他样品均>96%. Tnd, 无水芒硝; HI, 石盐; Gp, 石膏; Salts, 盐类矿物总含量

图4 DLT-P₃剖面样品的盐类矿物总含量、支链脂肪酸、archaeol、GDGT-0和bGDGTs含量变化

物(Pancost等, 2001; Niemann和Elvert, 2008). 在我们的样品中, 由于archaeol含量明显高于其他古菌来源的iGDGT化合物, 因此嗜盐古菌应该是沉积物中archaeol化合物的主要贡献者. 这种古菌生物来源也与前面产甲烷古菌与嗜盐古菌贡献的无环类异戊二烯烷酸的出现一致.

4.2 盐类环境生命保存特征对比分析

微生物来源的支链脂肪酸化合物在DLT-P₃芒硝层和黏土层中存在非常明显的含量和组成差异. 相比芒硝层(图5a), 黏土层中脂肪酸分子的含量更高、类型更丰富(图5c). 这种生物分子的分布特征在大浪滩表层样品及CEH-P₃剖面样品中也同样存在. 与含有23.5%碎屑矿物的样品DLT-S₅相比, 其他高盐样品中脂肪酸的多样性明显偏低. 我们之前分析过以石膏为主要盐类矿物的大浪滩剖面DLT-P₁和DLT-P₂, 发现两个剖面中黏土单元的支链脂肪酸含量和多样性明显高于高盐单元(Cheng等, 2017), 支链脂肪酸、不饱和脂肪酸和碳链长度大于20的脂肪酸主要出现在黏土单元(图5e). 然而, 这两个剖面的沉积特征相对简单, 每个剖面仅包含蒸发盐沉积单元和黏土沉积单元, 沉积物中盐类矿物组成也比较单一, 限制了我们系统认识盐

类物质中生物分子的分布规律及差异分布的主控因素. DLT-P₃剖面芒硝层及CEH-P₃剖面样品基本全部由盐类矿物组成, 区别于DLT-P₁和DLT-P₂的矿物组成, 代表了一类更为极端的盐类环境. 这类高盐环境明显限制细菌等微生物的生长, 甚至没有检测到细菌来源的支链脂肪酸, 而黏土层中细菌、古菌和可能的植物来源说明相对低盐的环境支持更多样化的生态系统. 同时, 结合样品的矿物学分析, 发现脂肪酸的差异分布主要受盐类矿物含量控制. 盐类矿物含量极高时, 支链脂肪酸、植烷酸的分布明显受限, 而这种差异分布与盐类矿物类型无关.

Atacama沙漠是地球上最接近火星的自然环境之一, 自2Ma起的极端干旱环境使得该地区大量干盐湖得以形成, 盐类沉积物中生命特征的研究早已开展. 通过分析Atacama沙漠一个2.5m深剖面类脂物的分布, 发现黏土层和蒸发盐层中脂肪酸、GDGTs分布和丰度均存在明显差异(Wilhelm等, 2017). 高盐的蒸发盐层中支链脂肪酸含量低于黏土层位, 脂肪酸的多样性也明显少于黏土层位(图5b、5d), 与柴达木盆地剖面样品的脂肪酸分布较为类似. 另一方面, 柴达木盆地DLT-P₃剖面黏土层中脂肪酸分布特征与Atacama沙漠样品也存在明显差异. 如图5d所示, Atacama沙漠Yun-

图 5 DLT-P₃剖面样品与Atacama Yungay(Wilhelm等, 2017)、DLT-P₂代表性样品的脂肪酸分布特征对比

galy剖面黏土层中高碳数脂肪酸含量均较高, 甚至占主导地位, 主峰碳处于C₂₂~C₂₈, 说明了Atacama沙漠黏土层沉积时的陆源植物输入。这种现象也与野外观察一致, 我们在盐类沉积物采样过程中未见植物痕迹, 而Atacama沙漠黏土层中可见纤维状植物碎片(Wilhelm等, 2017)。这种对比也进一步说明了柴达木盆地盐类环境的极端性, 例如比Atacama沙漠更高的太阳辐射强度(Georgiou等, 2015)。

前人对高盐的海洋、盐湖沉积物GDGTs化合物的研究表明, 高盐环境制约微生物的生长, 导致这类环境沉积物中GDGTs化合物含量较低甚至缺失, 但盐类矿物组成对这类化合物分布的影响还需深入调查。Stiehl等(2005)在死海沉积物中并未发现任何GDGTs, Turich和Freeman(2011)分析全球范围内海洋

高盐卤水沉积物中GDGTs化合物和archaeol分布时只检测到archaeol和GDGT-0。Jones(2011)分析澳大利亚中更新世的高盐沉积物中GDGTs分布, 结果只有20%的高盐样品检测到GDGT-0。李婧婧(2014)对茶卡盐湖沉积物分析发现高盐沉积物GDGTs化合物的分布也以高含量的GDGT-0化合物为主。前文提到的Atacama沙漠的2.5m深的盐类剖面中, 同样发现古菌来源的GDGT-0化合物和细菌合成的bGDGTs出现在底部的黏土层中, 却在顶部的石膏层中没有检测到(Wilhelm等, 2017)。对柴达木盆地盐类沉积物中GDGTs化合物和archaeol的分析结果确认了这一认识。柴达木盆地沉积物样品中GDGT-0以及较低含量细菌来源的bGDGTs化合物主要出现在DLT-P₃剖面黏土层中, 而其他古菌来源的iGDGTs化合物含量极低, 以至于大部

分样品中该类化合物都低于检测值。结合柴达木盆地样品的矿物组成分析, 进一步明确了盐类矿物含量控制GDGTs化合物的分布, 当盐类矿物含量极高时, 古菌来源的类脂物分布也受到限制。此外, 我们还认识到archaeol化合物在盐类沉积物中广泛分布。

4.3 天体生物学意义

地球极端环境生物分子研究能够为探索火星生命提供一种模式体, 这也是天体生物学近年来研究的热点问题。火星古湖泊盐类环境一直是寻找火星生命(或痕迹)的重要目标。除了广泛分布在火星表面的不同盐类含量的蒸发盐(郑绵平等, 2014), 着陆器“机遇号”返回的数据还显示火星梅里迪亚尼平原鹰陨击坑内出露厚约7m的由碎屑和硫酸盐构成的沉积剖面, 记录了一段时期的蒸发干旱事件(Grotzinger等, 2005), 与大浪滩剖面沉积特征极为相似。Mars 2020探测器已经着陆在火星Jezero撞击坑内, 在着陆点附近的湖相沉积物、包括黏土物质和可能存在的盐类物质中寻找生命的证据是这次火星探测的重要使命之一(Tarnas等, 2019; Horgan等, 2020)。与柴达木盆地相比, 火星环境具有更温和的成岩作用及更低的温度, 这对于生物分子的保存更有利(Fernández-Remolar等, 2013)。

柴达木盆地盐类沉积物中类脂分子的分布特征能在今后限定和有目的地寻找火星盐类环境可能存在的生命痕迹提供重要参考。结合柴达木盆地不同矿物组成及沉积特征的蒸发盐剖面 and 表层盐类样品, 并与其他盐类环境沉积物中类脂物保存特征对比, 我们发现微生物来源的类脂物在盐类沉积物中存在明显的分布规律。已有的火星探测能够评估火星沉积物中盐类含量(Clark等, 2005; Karunatillake等, 2007), 由于地球盐类矿物含量是控制沉积物中类脂物分布的主要因素, 因此火星不同盐类含量的沉积物中可能保存的生物分子应该存在差异。

火星地表的电离辐射每年高达0.54~0.85Gyr(Dartnell等, 2007), 对保存有机分子极为不利。前人研究表明, 每经过300Myr, 火星电离辐射会使表层5cm沉积物中生物大分子含量降低1000倍, 这些生物大分子包括GDGTs化合物和archaeol(Pavlov等, 2012)。地球盐类沉积物中GDGTs化合物含量较低, 我们的样品中GDGTs化合物总含量最高值为23.29ng g⁻¹。如果这些化合物经过数十亿年的火星地表电离辐射, 它们很难

被仪器检测到。因此, 火星地下的盐类沉积物才是寻找火星生命的潜在目标。好奇号火星车最大钻探深度为6cm, 而ExoMars计划设计的最大钻探深度为2m, 满足有机信号被检测到的条件。海盗号和好奇号都曾携带GC-MS, 也满足检测archaeol等化合物的仪器条件。Archaeol化合物在地球高盐环境中广泛分布, 火星地下盐类沉积物中archaeol化合物是值得关注的潜在生命信号。

5 结论

本文对柴达木盆地大浪滩表层沉积物、DLT-P₃剖面和察尔汗CEH-P₃剖面盐类沉积物样品开展了类脂物分布的初步分析, 并与前人发表的不同沉积环境或沉积特征盐类中类脂物分布进行了对比, 得到的主要认识如下:

(1) 大浪滩4个表层样品的矿物组成存在明显差异, DLT-P₃剖面为黏土层和芒硝层互层明显的韵律沉积物, 察尔汗CEH-P₃剖面则为矿物组成单一的石盐沉积物。类脂物在这些沉积物中存在差异分布, 当盐类矿物含量极高时, 类脂物分布受到限制。这种差异分布与沉积物样品中盐类矿物总含量相关, 而与盐类矿物的类型无关。

(2) 大浪滩DLT-P₃剖面低盐黏土层中包含正构和不饱和脂肪酸, 无环类异戊二烯烷酸和甲基支链脂肪酸也被检测到。大浪滩表层样品DLT-S₅中也检测到了不饱和脂肪酸。这种分布特征表明这些沉积物样品中微生物发育。DLT-P₃剖面芒硝层、大浪滩3个高盐表层样品与CEH-P₃剖面样品中未检测到明显的支链脂肪酸, 表明高盐环境会限制细菌微生物的生长。

(3) 大浪滩DLT-P₃剖面样品中检测到GDGTs和archaeol化合物, 其中archaeol含量最高, 古菌合成的GDGT-0次之, 黏土层中archaeol和GDGT-0含量明显高于芒硝层。大浪滩表层样品DLT-S₅中也检测到了archaeol和较低含量的GDGT-0化合物, 其他3个高盐表层样品及CEH-P₃剖面样品中检测到了较低含量的archaeol化合物, 但未检测到GDGTs化合物。这种现象表明盐类矿物含量同样控制GDGTs化合物的含量变化。产甲烷古菌与嗜盐古菌分别是盐类样品中GDGT-0和archaeol化合物的主要贡献者。

最后, 通过与盐类环境生命保存其他研究成果的

对比分析, 明确了盐类沉积物中类脂物的分布规律、差异分布的主控因素及高盐沉积物中值得关注的生物分子. 本文的研究结果为限定和综合评价火星蒸发盐中可能存在的生命痕迹提供了一种类比模式.

致谢 感谢中国地质大学(武汉)王江及赵健楠博士在采样中的帮助.

参考文献

- 柴丽红, 崔晓龙, 彭谦, 徐丽华, 姜成林. 2004. 青海两盐湖细菌多样性研究. *微生物学报*, 44: 271–275
- 陈宗颜, 陈克龙, 罗正霞. 2011. 察尔汗地区130ka B.P.以来湖相沉积物颜色记录的气候变化探讨. *盐湖研究*, 19: 1–7, 14
- 康晏, 王万春, 张道伟, 任军虎. 2006. 柴达木盆地第四系脂肪酸生标的检出及其地质意义. *沉积学报*, 24: 456–460
- 李婧婧. 2014. 不同盐度湖泊微生物脂类分布特征及其环境意义. 博士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1–123
- 马妮娜, 郑绵平, 马志邦, 陈文西, 孔凡晶, 施林峰. 2011. 柴达木盆地大浪滩地区表层芒硝的形成时代及环境意义. *地质学报*, 85: 433–444
- 杨欢. 2010. 中国土壤微生物类脂物对现代过程的响应及其古环境意义. 硕士学位论文. 武汉: 中国地质大学. 1–66
- 杨欢, 丁伟华, 谢树成. 2014. 海南尖峰岭不同海拔土壤中微生物脂脂肪酸和脂肪醇分布特征及对古海拔、古温度重建的启示. *中国科学: 地球科学*, 44: 1229–1243
- 郑绵平, 孔维刚, 陈文西, 孔凡晶, 张雪飞. 2014. 地球同火星蒸发岩沉积的对比. *高校地质学报*, 20: 169–176
- 朱允铸, 钟坚华, 李文生. 1994. 柴达木盆地新构造运动及盐湖发展演化. 北京: 地质出版社. 79
- Anglés A, Li Y L. 2017. Similar ring structures on Mars and Tibetan Plateau confirm recent tectonism on Martian Northern polar region. *Int J Astrobiol*, 16: 355–359
- Blaga C I, Reichart G J, Heiri O, Sinninghe Damsté J S. 2009. Tetraether membrane lipid distributions in water-column particulate matter and sediments: A study of 47 European lakes along a north-south transect. *J Paleolimnol*, 41: 523–540
- Bowen B B, Benison K C, Oboko-Ikuenobe F E, Story S, Mormile M R. 2008. Active hematite concretion formation in modern acid saline lake sediments, Lake Brown, Western Australia. *Earth Planet Sci Lett*, 268: 52–63
- Cheng Z Y, Xiao L, Wang H M, Yang H, Li J J, Huang T, Xu Y, Ma N N. 2017. Bacterial and archaeal lipids recovered from subsurface evaporites of Dalangtan Playa on the Tibetan Plateau and their astrobiological implications. *Astrobiology*, 17: 1112–1122
- Clark B C, Morris R V, McLennan S M, Gellert R, Jolliff B, Knoll A H, Squyres S W, Lowenstein T K, Ming D W, Tosca N J, Yen A, Christensen P R, Gorevan S, Brückner J, Calvin W, Dreibus G, Farrand W, Klingelhoefer G, Waenke H, Zipfel J, Bell III J F, Grotzinger J, McSween H Y, Rieder R. 2005. Chemistry and mineralogy of outcrops at Meridiani Planum. *Earth Planet Sci Lett*, 240: 73–94
- Cockell C S, Bush T, Bryce C, Direito S, Fox-Powell M, Harrison J P, Lammer H, Landenmark H, Martin-Torres J, Nicholson N, Noack L, O'Malley-James J, Payler S J, Rushby A, Samuels T, Schwendner P, Wadsworth J, Zorzano M P. 2016. Habitability: A review. *Astrobiology*, 16: 89–117
- 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. *J Geophys Res-Planets*, 123: 1910–1933
- Dang Y N, Zhang F, Zhao J N, Wang J, Xu Y, Huang T, Xiao L. 2020. Diverse polygonal patterned grounds in the Northern Eridania Basin, Mars: Possible origins and implications. *J Geophys Res-Planets*, 125: e06647
- Dartnell L R, Desorgher L, Ward J M, Coates A J. 2007. Modelling the surface and subsurface martian radiation environment: Implications for astrobiology. *Geophys Res Lett*, 34: L02207
- Eigenbrode J L, Summons R E, Steele A, Freissinet C, Millan M, Navarro-González R, Sutter B, McAdam A C, Franz H B, Glavin D P, Archer Jr P D, Mahaffy P R, Conrad P G, Hurowitz J A, Grotzinger J P, Gupta S, Ming D W, Sumner D Y, Szopa C, Malespin C, Buch A, Coll P. 2018. Organic matter preserved in 3-billion-year-old mudstones at Gale crater, Mars. *Science*, 360: 1096–1101
- El-Maarry M R, Pommerol A, Thomas N. 2013. Analysis of polygonal cracking patterns in chloride-bearing terrains on Mars: Indicators of ancient playa settings. *J Geophys Res-Planets*, 118: 2263–2278
- Fairén A G, Davila A F, Lim D, Bramall N, Bonaccorsi R, Zavaleta J, Uceda E R, Stoker C, Wierzbos J, Dohm J M, Amils R, Andersen D, McKay C P. 2010. Astrobiology through the ages of Mars: The study of terrestrial analogues to understand the habitability of Mars. *Astrobiology*, 10: 821–843
- Fernández-Remolar D C, Morris R V, Gruener J E, Amils R, Knoll A H. 2005. The Rio Tinto Basin, Spain: Mineralogy, sedimentary geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars. *Earth Planet Sci Lett*, 240: 149–167
- Fernández-Remolar D C, Chong-Díaz G, Ruiz-Bermejo M, Harir M, Schmitt-Kopplin P, Tziotis D, Gómez-Ortiz D, García-Villadangos M, Martín-Redondo M P, Gómez F, Rodríguez-Manfredi J A,

- Moreno-Paz M, De Diego-Castilla G, Echeverría A, Urtuvia V N, Blanco Y, Rivas L, Izawa M R M, Banerjee N R, Demergasso C, Parro V. 2013. Molecular preservation in halite- and perchlorate-rich hypersaline subsurface deposits in the Salar Grande basin (Atacama Desert, Chile): Implications for the search for molecular biomarkers on Mars. *J Geophys Res-Biogeosci*, 118: 922–939
- Fernandez A B, Rasuk M C, Visscher P T, Contreras M, Novoa F, Poire D G, Patterson M M, Ventosa A, Farias M E. 2016. Microbial diversity in sediment ecosystems (evaporites domes, microbial mats, and crusts) of hypersaline Laguna Tebenquiche, Salar de Atacama, Chile. *Front Microbiol*, 7: 1284
- Georgiou C D, Deamer D W. 2014. Lipids as universal biomarkers of extraterrestrial life. *Astrobiology*, 14: 541–549
- Georgiou C D, Sun H J, McKay C P, Grintzalis K, Papapostolou I, Zisimopoulos D, Panagiotidis K, Zhang G, Koutsopoulou E, Christidis G E, Margiolaki I. 2015. Evidence for photochemical production of reactive oxygen species in desert soils. *Nat Commun*, 6: 7100
- Gharaibeh A A, Voorhees K J. 1996. Characterization of lipid fatty acids in whole-cell microorganisms using in situ supercritical fluid derivatization/extraction and gas chromatography/mass spectrometry. *Anal Chem*, 68: 2805–2810
- Gong C, Hollander D J. 1997. Differential contribution of bacteria to sedimentary organic matter in oxic and anoxic environments, Santa Monica Basin, California. *Org Geochem*, 26: 545–563
- Grotzinger J P, Arvidson R E, Bell Iii J F, Calvin W, Clark B C, Fike D A, Golombek M, Greeley R, Haldemann A, Herkenhoff K E, Jolliff B L, Knoll A H, Malin M, McLennan S M, Parker T, Soderblom L, Sohl-Dickstein J N, Squyres S W, Tosca N J, Watters W A. 2005. Stratigraphy and sedimentology of a dry to wet eolian depositional system, Burns formation, Meridiani Planum, Mars. *Earth Planet Sci Lett*, 240: 11–72
- Grotzinger J P, Sumner D Y, Kah L C, Stack K, Gupta S, Edgar L, Rubin D, Lewis K, Schieber J, Mangold N, Milliken R, Conrad P G, DesMarais D, Farmer J, Siebach K, Calef F, Hurowitz J, McLennan S M, Ming D, Vaniman D, Crisp J, Vasavada A, Edgett K S, Malin M, Blake D, Gellert R, Mahaffy P, Wiens R C, Maurice S, Grant J A, Wilson S, Anderson R C, Beegle L, Arvidson R, Hallet B, Sletten R S, Rice M, Bell J, Griffes J, Ehlmann B, Anderson R B, Bristow T F, Dietrich W E, Dromart G, Eigenbrode J, Fraeman A, Hardgrove C, Herkenhoff K, Jandura L, Kocurek G, Lee S, Leshin L A, Leveille R, Limonadi D, Maki J, McCloskey S, Meyer M, Minitti M, Newsom H, Oehler D, Okon A, Palucis M, Parker T, Rowland S, Schmidt M, Squyres S, Steele A, Stolper E, Summons R, Treiman A, Williams R, Yingst A, Team M S, Kempainen O, Bridges N, Johnson J R, Cremers D, Godber A, Wadhwa M, Wellington D, McEwan I, Newman C, Richardson M, Charpentier A, Peret L, King P, Blank J, Weigle G, Li S, Robertson K, Sun V, Baker M, Edwards C, Farley K, Miller H, Newcombe M, Pilorget C, Brunet C, Hipkin V, Leveille R, Marchand G, Sanchez P S, Favot L, Cody G, Fluckiger L, Lees D, Nefian A, Martin M, Gailhanou M, Westall F, Israel G, Agard C, Baroukh J, Donny C, Gaboriaud A, Guillemot P, Lafaille V, Lorigny E, Paillet A, Perez R, Saccoccio M, Yana C, Armiens-Aparicio C, Rodriguez J C, Blazquez I C, Gomez F G, Gomez-Elvira J, Hettrich S, Malvitte A L, Jimenez M M, Martinez-Frias J, Martin-Soler J, Martin-Torres F J, Jurado A M, Mora-Sotomayor L, Caro G M, Lopez S N, Peinado-Gonzalez V, Plagarcia J, Manfredi J A R, Romeral-Planello J J, Fuentes S A S, Martinez E S, Redondo J T, Urqui-O'Callaghan R, Mier M P Z, Chipera S, Lacour J L, Mauchien P, Sirven J B, Manning H, Fairén A, Hayes A, Joseph J, Sullivan R, Thomas P, Dupont A, Lundberg A, Melikechi N, Mezzacappa A, DeMarines J, Grinspoon D, Reitz G, Prats B, Atlaskin E, Genzer M, Harri A M, Haukka H, Kahanpaa H, Kauhanen J, Paton M, Polkko J, Schmidt W, Siili T, Fabre C, Wray J, Wilhelm M B, Poitrasson F, Patel K, Gorevan S, Indyk S, Paulsen G, Bish D, Gondet B, Langevin Y, Geffroy C, Baratoux D, Berger G, Cros A, d'Uston C, Forni O, Gasnault O, Lasue J, Lee Q M, Meslin P Y, Pallier E, Parot Y, Pinet P, Schroder S, Toplis M, Lewin E, Brunner W, Heydari E, Achilles C, Sutter B, Cabane M, Coscia D, Szopa C, Robert F, Sautter V, Le Mouelic S, Nachon M, Buch A, Stalport F, Coll P, Francois P, Raulin F, Teinturier S, Cameron J, Clegg S, Cousin A, DeLapp D, Dingler R, Jackson R S, Johnstone S, Lanza N, Little C, Nelson T, Williams R B, Jones A, Kirkland L, Baker B, Cantor B, Caplinger M, Davis S, Duston B, Fay D, Harker D, Herrera P, Jensen E, Kennedy M R, Krezoski G, Krysak D, Lipkaman L, McCartney E, McNair S, Nixon B, Posiolova L, Ravine M, Salamon A, Saper L, Stoiber K, Supulver K, Van Beek J, Van Beek T, Zimdar R, French K L, Iagnemma K, Miller K, Goesmann F, Goetz W, Hviid S, Johnson M, Lefavor M, Lyness E, Breves E, Dyar M D, Fassett C, Edwards L, Haberle R, Hoehler T, Hollingsworth J, Kahre M, Keely L, McKay C, Bleacher L, Brinckerhoff W, Choi D, Dworkin J P, Floyd M, Freissinet C, Garvin J, Glavin D, Harpold D, Martin D K, McAdam A, Pavlov A, Raaen E, Smith M D, Stern J, Tan F, Trainer M, Posner A, Voytek M, Aubrey A, Behar A, Blaney D, Brinza D, Christensen L, DeFlores L, Feldman J, Feldman S, Flesch G, Jun I, Keymeulen D, Mischna M, Morookian J M, Pavri B, Schoppers M, Sengstacken A, Simmonds J J, Spanovich N, Juarez M T, Webster C R, Yen A, Archer P D, Cucinotta F, Jones J H, Morris R V, Niles P, Rampe E, Nolan T, Fisk M, Radziemski L, Barraclough B, Bender S, Berman D, Dobrea E N, Tokar R, Cleghorn T, Huntress W, Manhes G, Hudgins J, Olson T, Stewart N, Sarrazin P, Vicenzi E, Bullock M,

- Ehresmann B, Hamilton V, Hassler D, Peterson J, Rafkin S, Zeitlin C, Fedosov F, Golovin D, Karpushkina N, Kozyrev A, Litvak M, Malakhov A, Mitrofanov I, Mokrousov M, Nikiforov S, Prokhorov V, Sanin A, Tretyakov V, Varenikov A, Vostrukhin A, Kuzmin R, Clark B, Wolff M, Botta O, Drake D, Bean K, Lemmon M, Schwenzer S P, Lee E M, Sucharski R, Hernandez M A P, Avalos J J B, Ramos M, Kim M H, Malespin C, Plante I, Muller J P, Navarro-Gonzalez R, Ewing R, Boynton W, Downs R, Fitzgibbon M, Harshman K, Morrison S, Kortmann O, Williams A, Lugmair G, Wilson M A, Jakosky B, Balic-Zunic T, Frydenvang J, Jensen J K, Kinch K, Koefoed A, Madsen M B, Stipp S L S, Boyd N, Campbell J L, Perrett G, Pradler I, VanBommel S, Jacob S, Owen T, Savijarvi H, Boehm E, Bottcher S, Burmeister S, Guo J, Kohler J, Garcia C M, Mueller-Mellin R, Wimmer-Schweingruber R, Bridges J C, McConnochie T, Benna M, Franz H, Bower H, Brunner A, Blau H, Boucher T, Carmosino M, Atreya S, Elliott H, Halleaux D, Renno N, Wong M, Pepin R, Elliott B, Spray J, Thompson L, Gordon S, Ollila A, Williams J, Vasconcelos P, Bentz J, Nealson K, Popa R, Moersch J, Tate C, Day M, Francis R, McCullough E, Cloutis E, ten Kate I L, Scholes D, Slavney S, Stein T, Ward J, Berger J, Moores J E. 2014. A habitable fluvio-lacustrine environment at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. *Science*, 343: 1242777
- Hamilton C W, Mouginiis-Mark P J, Sori M M, Scheidt S P, Bramson A M. 2018. Episodes of aqueous flooding and effusive volcanism associated with Hrad Vallis, Mars. *J Geophys Res-Planets*, 123: 1484–1510
- Horgan B H N, Anderson R B, Dromart G, Amador E S, Rice M S. 2020. The mineral diversity of Jezero crater: Evidence for possible lacustrine carbonates on Mars. *Icarus*, 339: 113526
- Jiang H C, Dong H L, Zhang G X, Yu B S, Chapman L R, Fields M W. 2006. Microbial diversity in water and sediment of Lake Chaka, an athalassohaline lake in northwestern China. *Appl Environ Microbiol*, 72: 3832–3845
- Jones C M. 2011. Reconstruction of microbial and environmental conditions in an Australian hypersaline ecosystem from the mid-Pleistocene through the present. Dissertation for Doctoral Degree. Berkeley: University of California
- Kaneda T. 1991. Iso- and anteiso-fatty acids in bacteria: Biosynthesis, function, and taxonomic significance. *Microbiol Rev*, 55: 288–302
- Karunatillake S, Keller J M, Squyres S W, Boynton W V, Brückner J, Janes D M, Gasnault O, Newsom H E. 2007. Chemical compositions at Mars landing sites subject to Mars Odyssey Gamma Ray Spectrometer constraints. *J Geophys Res*, 112: E08S90
- Kerber L, Dickson J L, Head J W, Grosfils E B. 2017. Polygonal ridge networks on Mars: Diversity of morphologies and the special case of the Eastern Medusae Fossae Formation. *Icarus*, 281: 200–219
- Kronyak R E, Kah L C, Edgett K S, VanBommel S J, Thompson L M, Wiens R C, Sun V Z, Nachon M. 2019. Mineral-filled fractures as indicators of multigenerational fluid flow in the Pahrump Hills member of the Murray formation, Gale crater, Mars. *Earth Space Sci*, 6: 238–265
- Klenner F, Postberg F, Hillier J, Khawaja N, Reviol R, Stolz F, Cable M L, Abel B, Nölle L. 2020. Analog experiments for the identification of trace biosignatures in ice grains from extraterrestrial ocean worlds. *Astrobiology*, 20: 179–189
- Kong F J, Zheng M P, Hu B, Wang A L, Ma N N, Sobron P. 2018. Dalangtan Saline Playa in a hyperarid region on Tibet Plateau: I. Evolution and environments. *Astrobiology*, 18: 1243–1253
- Niemann H, Elvert M. 2008. Diagnostic lipid biomarker and stable carbon isotope signatures of microbial communities mediating the anaerobic oxidation of methane with sulphate. *Org Geochem*, 39: 1668–1677
- Osterloo M M, Hamilton V E, Bandfield J L, Glotch T D, Baldridge A M, Christensen P R, Tornabene L L, Anderson F S. 2008. Chloride-bearing materials in the southern highlands of Mars. *Science*, 319: 1651–1654
- Pavlov A A, Vasilyev G, Ostryakov V M, Pavlov A K, Mahaffy P. 2012. Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays. *Geophys Res Lett*, 39: L13202
- Pancost R D, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2001. Archaeal lipids in Mediterranean cold seeps: Molecular proxies for anaerobic methane oxidation. *Geochim Cosmochim Acta*, 65: 1611–1627
- Rasuk M C, Kurth D, Flores M R, Contreras M, Novoa F, Poire D, Farias M E. 2014. Microbial characterization of microbial ecosystems associated to evaporites domes of gypsum in Salar de Llamara in Atacama Desert. *Microb Ecol*, 68: 483–494
- Rütters H, Sass H, Cypionka H, Rullkötter J. 2002. Phospholipid analysis as a tool to study complex microbial communities in marine sediments. *J Microbiol Methods*, 48: 149–160
- Sánchez-García L, Aeppli C, Parro V, Fernández-Remolar D, García-Villadangos M, Chong-Díaz G, Blanco Y, Carrizo D. 2018. Molecular biomarkers in the subsurface of the Salar Grande (Atacama, Chile) evaporitic deposits. *Biogeochemistry*, 140: 31–52
- Schouten S, Hopmans E C, Sinninghe Damsté J S. 2013. The organic geochemistry of glycerol dialkyl glycerol tetraether lipids: A review. *Org Geochem*, 54: 19–61
- Schouten S, Van Der Maarel M J E C, Huber R, Damsté J S S. 1997. 2,6,10,15,19-Pentamethylcosenes in *Methanobolus bombayensis*, a marine methanogenic archaeon, and in *Methanosarcina mazei*. *Org Geochem*, 26: 409–414
- Schubert B A, Lowenstein T K, Timofeeff M N, Parker M A. 2010.

- Halophilic *Archaea* cultured from ancient halite, Death Valley, California. *Environ Microbiol*, 12: 440–454
- Stiehl T, Rullkötter J, Nissenbaum A. 2005. Molecular and isotopic characterization of lipids in cultured halophilic microorganisms from the Dead Sea and comparison with the sediment record of this hypersaline lake. *Org Geochem*, 36: 1242–1251
- Tan J, Lewis J M T, Sephton M A. 2018. The fate of lipid biosignatures in a Mars-analogue sulfur stream. *Sci Rep*, 8: 7586
- Tanaka K L, Robbins S J, Fortezzo C M, Skinner Jr. J A, Hare T M. 2014. The digital global geologic map of Mars: Chronostratigraphic ages, topographic and crater morphologic characteristics, and updated resurfacing history. *Planet Space Sci*, 95: 11–24
- Tarnas J D, Mustard J F, Lin H, Goudge T A, Amador E S, Bramble M S, Kremer C H, Zhang X, Itoh Y, Parente M. 2019. Orbital identification of hydrated silica in Jezero Crater, Mars. *Geophys Res Lett*, 46: 12771–12782
- Turich C, Freeman K H. 2011. Archaeal lipids record paleosalinity in hypersaline systems. *Org Geochem*, 42: 1147–1157
- Vaniman D T, Bish D L, Ming D W, Bristow T F, Morris R V, Blake D F, Chipera S J, Morrison S M, Treiman A H, Rampe E B, Rice M, Achilles C N, Grotzinger J P, McLennan S M, Williams J, Bell J F, Newsom H E, Downs R T, Maurice S, Sarrazin P, Yen A S, Morookian J M, Farmer J D, Stack K, Milliken R E, Ehlmann B L, Sumner D Y, Berger G, Crisp J A, Hurowitz J A, Anderson R, Des Marais D J, Stolper E M, Edgett K S, Gupta S, Spanovich N, Agard C, Alves Verdasca J A, Anderson R, Archer D, Armiens-Aparicio C, Arvidson R, Atkinson E, Atreya S, Aubrey A, Baker B, Baker M, Balic-Zunic T, Baratoux D, Baroukh J, Barraclough B, Bean K, Beegle L, Behar A, Bender S, Benna M, Bentz J, Berger J, Berman D, Blanco Avalos J J, Blaney D, Blank J, Blau H, Bleacher L, Boehm E, Botta O, Botcher S, Boucher T, Bower H, Boyd N, Boynton B, Breves E, Bridges J, Bridges N, Brinckerhoff W, Brinza D, Brunet C, Brunner A, Brunner W, Buch A, Bullock M, Burmeister S, Cabane M, Calef F, Cameron J, Campbell J I, Cantor B, Caplinger M, Caride Rodriguez J, Carmosino M, Carrasco Blazquez I, Charpentier A, Choi D, Clark B, Clegg S, Cleghorn T, Cloutis E, Cody G, Coll P, Conrad P, Coscia D, Cousin A, Cremers D, Cros A, Cucinotta F, d'Uston C, Davis S, Day M K, de la Torre Juarez M, DeFlores L, DeLapp D, DeMarines J, Dietrich W, Dingler R, Donny C, Drake D, Dromart G, Dupont A, Duston B, Dworkin J, Dyar M D, Edgar L, Edwards C, Edwards L, Ehresmann B, Eigenbrode J, Elliott B, Elliott H, Ewing R, Fabre C, Fairen A, Farley K, Fassett C, Favot L, Fay D, Fedosov F, Feldman J, Feldman S, Fisk M, Fitzgibbon M, Flesch G, Floyd M, Fluckiger L, Forni O, Fraeman A, Francis R, Francois P, Franz H, Freissinet C, French K L, Frydenvang J, Gaboriaud A, Gailhanou M, Garvin J, Gasnault O, Geffroy C, Gellert R, Genzer M, Glavin D, Godber A, Goesmann F, Goetz W, Golovin D, Gomez Gomez F, Gomez-Elvira J, Gondet B, Gordon S, Gorevan S, Grant J, Griffes J, Grinspoon D, Guillemot P, Guo J, Guzewich S, Haberle R, Halleaux D, Hallet B, Hamilton V, Hardgrove C, Harker D, Harpold D, Harri A M, Harshman K, Hassler D, Haukka H, Hayes A, Herkenhoff K, Herrera P, Hettrich S, Heydari E, Hipkin V, Hoehler T, Hollingsworth J, Hudgins J, Huntress W, Hviid S, Iagnemma K, Indyk S, Israel G, Jackson R, Jacob S, Jakosky B, Jensen E, Jensen J K, Johnson J, Johnson M, Johnstone S, Jones A, Jones J, Joseph J, Jun I, Kah L, Kahanpaa H, Kahre M, Karpushkina N, Kasprzak W, Kauhanen J, Keely L, Kempainen O, Keymeulen D, Kim M H, Kinch K, King P, Kirkland L, Kocurek G, Koefoed A, Kohler J, Kortmann O, Kozyrev A, Krezoski J, Krysak D, Kuzmin R, Lacour J L, Lafaille V, Langevin Y, Lanza N, Lasue J, Le Mouelic S, Lee E M, Lee Q M, Lees D, Lefavor M, Lemmon M, Malville A L, Leshin L, Leveille R, Lewin-Carpentier E, Lewis K, Li S, Lipkaman L, Little C, Litvak M, Lorigny E, Lugmair G, Lundberg A, Lyness E, Madsen M, Mahaffy P, Maki J, Malakhov A, Malespin C, Malin M, Mangold N, Manhes G, Manning H, Marchand G, Marin Jimenez M, Martin Garcia C, Martin D, Martin M, Martinez-Frias J, Martin-Soler J, Martin-Torres F J, Mauchien P, McAdam A, McCartney E, McConnochie T, McCullough E, McEwan I, McKay C, McNair S, Melikechi N, Meslin P Y, Meyer M, Mezzacappa A, Miller H, Miller K, Minitti M, Mischna M, Mitrofanov I, Moersch J, Mokrousov M, Molina Jurado A, Moores J, Mora-Sotomayor L, Mueller-Mellin R, Muller J P, Munoz Caro G, Nachon M, Navarro Lopez S, Navarro-Gonzalez R, Nealson K, Nefian A, Nelson T, Newcombe M, Newman C, Nikiforov S, Niles P, Nixon B, Noe Dobrea E, Nolan T, Oehler D, Ollila A, Olson T, Owen T, de Pablo Hernandez M A, Paillet A, Pallier E, Palucis M, Parker T, Parot Y, Patel K, Paton M, Paulsen G, Pavlov A, Pavri B, Peinado-Gonzalez V, Pepin R, Peret L, Perez R, Perrett G, Peterson J, Pilorget C, Pinet P, Pla-Garcia J, Plante I, Poitrasson F, Polkko J, Popa R, Posiolova L, Posner A, Pradler I, Prats B, Prokhorov V, Purdy S W, Raaen E, Radziemski L, Rafkin S, Ramos M, Raulin F, Ravine M, Reitz G, Renno N, Richardson M, Robert F, Robertson K, Rodriguez Manfredi J A, Romeral-Planella J J, Rowland S, Rubin D, Saccoccio M, Salamon A, Sandoval J, Sanin A, Sans Fuentes S A, Saper L, Sautter V, Savijarvi H, Schieber J, Schmidt M, Schmidt W, Scholes D D, Schoppers M, Schroder S, Schwenzer S, Sebastian Martinez E, Sengstacken A, Shterts R, Siebach K, Siili T, Simmonds J, Sirven J B, Slavney S, Sletten R, Smith M, Sobron Sanchez P, Spray J, Squyres S, Stalport F, Steele A, Stein T, Stern J, Stewart N, Stipp S L S, Stoiber K, Sucharski B, Sullivan R, Summons R, Sun V, Supulver K, Sutter B, Szopa C, Tan F, Tate C, Teinturier S, ten Kate

- I, Thomas P, Thompson L, Tokar R, Toplis M, Torres Redondo J, Trainer M, Tretyakov V, Urqui-O'Callaghan R, Van Beek J, Van Beek T, VanBommel S, Varenikov A, Vasavada A, Vasconcelos P, Vicenzi E, Vostrukhin A, Voytek M, Wadhwa M, Ward J, Webster C, Weigle E, Wellington D, Westall F, Wiens R C, Wilhelm M B, Williams A, Williams R, Williams R B M, Wilson M, Wimmer-Schweingruber R, Wolff M, Wong M, Wray J, Wu M, Yana C, Yingst A, Zeitlin C, Zimdar R, Zorzano Mier M P. 2014. Mineralogy of a mudstone at Yellowknife Bay, Gale crater, Mars. *Science*, 343: 1243480
- Wang A L, Sobron P, Kong F J, Zheng M P, 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
- Westall F, Foucher F, Bost N, Bertrand M, Loizeau D, Vago J L, Kminek G, Gaboyer F, Campbell K A, Bréhéret J G, Gautret P, Cockell C S. 2015. Biosignatures on Mars: What, where, and how? Implications for the search for Martian life. *Astrobiology*, 15: 998–1029
- Wilhelm M B, Davila A F, Eigenbrode J L, Parenteau M N, Jahnke L L, Liu X L, Summons R E, Wray J J, Stamos B N, O'Reilly S S, Williams A. 2017. Xeropreservation of functionalized lipid biomarkers in hyperarid soils in the Atacama Desert. *Org Geochem*, 103: 97–104
- Williams A J, Craft K L, Millan M, Johnson S S, Knudson C A, Juarez Rivera M, McAdam A C, Tobler D, Skok J R. 2021. Fatty acid preservation in modern and relict hot-spring deposits in Iceland, with implications for organics detection on Mars. *Astrobiology*, 21: 60–82
- Xiao L, Wang J, Dang Y N, Cheng Z Y, Huang T, Zhao J N, Xu Y, Huang J, Xiao Z Y, Komatsu G. 2016. A new terrestrial analogue site for Mars research: The Qaidam Basin, Tibetan Plateau (NW China). *Earth-Sci Rev*, 164: 84–101
- Xie S C, Chen F H, Wang Z Y, Wang H M, Gu Y S, Huang Y S. 2003. Lipid distributions in loess-paleosol sequences from northwest China. *Org Geochem*, 34: 1071–1079

(责任编辑: 张传伦)