



我国未来在轨监测火星沙尘暴的设想和方案

戎昭金^{1,2,3*}, 魏勇^{1,2*}, 何飞^{1,2}, 高佳维^{1,2}, 范开^{1,2}, 王誉棋^{1,2}, 曹露⁴, 闫丽梅^{1,2}, 任志鹏^{1,2}, 周旭^{1,2}, 谭宁⁵, 余涛⁶

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院地球与行星物理重点实验室, 北京 100029;
 2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049;
 3. 中国科学院地质与地球物理研究所, 黑龙江漠河地球物理国家野外科学观测研究站, 漠河 165303;
 4. 北京大学北京国际数学研究中心, 北京 100080;
 5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;
 6. 中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院, 武汉 430074
- * 联系人, E-mail: rongzhaojin@mail.iggcas.ac.cn; weiy@mail.iggcas.ac.cn

火星是地球的近邻, 它的自转周期(约为24.6 h)及自转倾角(约为25°)都与地球的接近。火星公转周期为687 d, 有稀薄的大气(主要成分为CO₂), 有四季交替的气候变化, 表面温度(夏天)最高时可达20°C。火星两极被冰(干冰和水冰的混合物)所覆盖, 并有着消融和冰冻的季节周期变化。火星表面布满河道、峡谷、沟壑、冲积平原等地貌特征。在太阳系行星系统中, 火星的气候环境最为接近地球。研究表明, 至少在30多亿年前, 火星可能是一颗具有全球磁场、丰富液态水、稠密大气的宜居星球^[1]。所以, 多年来火星一直是人类进行行星探索、寻找地外生命的理想星球。

目前, 人类对火星已开展了50多次探索任务, 对火星取得了深入的科学认知。当前火星探测如火如荼, 美国、欧洲多国、印度、阿联酋等国家或地区正在积极开展火星科学探测, 未来还部署了火星采样返回、载人登火等系列探测任务^[2,3]。我国首次火星科学探测任务——“天问一号”于2020年7月23日发射, 2021年2月10日成功入轨, 并于2021年5月15日成功着陆祝融号火星车, 对火星一次性圆满完成了“绕、落、巡”的工程任务目标。“天问一号”的成功实施实现了我国从地月系向太阳系探测的跨越。截至目前, “天问一号”已返回了大量火星科学探测数据, 我国科学家正在紧锣密鼓地开展科学分析工作。继“天问一号”后, 我国未来还将实施“天问三号”——火星采样返回任务^[4]。

大量观测表明火星表面沙尘活动频发。尤其每逢火星南半球春、夏季节, 火星常有大规模的沙尘活动爆发, 沙尘活动有时甚至能覆盖火星全球。这给火星探测任务带来了极大的干扰和威胁。沙尘会覆盖火星车的太阳能电池板, 影响火星车的工作运转, 并引发机械故障。譬如, 美国的勇气号(Spirit)火星车因被困沙土中导致太阳能电池板无法转向而失联, 而机遇号(Opportunity)火星车则在2018年的火星全球性沙尘暴中失联。美国毅力号(Perseverance)火星车携带的仪器则被



戎昭金 中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 中国科学院大学岗位教授, 中国地球物理学会行星物理专业委员会秘书长。曾获2015年中国地球物理学会“傅承义青年科技奖”。主要从事行星空间环境及行星磁场方面的研究工作。



魏勇 中国科学院地质与地球物理研究所副所长、研究员。曾获欧洲地球科学联合会杰出青年科学家奖、中国科学院青年科学家奖、中国青年科技奖。长期从事地球与行星空间环境、行星科学史等方面的研究, 致力于行星科学一级学科建设。

沙尘暴吹起的鹅卵石击中损坏(<https://cosmosmagazine.com/space/perseverance-rover-wind-pebble/>)。我国祝融号火星车在2022年5月18日转入“休眠”模式^[5]。此外, 在临近或沙尘暴期间, 火星大气温压条件及风场均有快速变化, 这会对火星表面探测器的进入、下降、着陆过程, 及返回时的起飞、爬升、入轨过程等带来严重影响。

为保障我国未来火星采样返回任务的顺利进行, 并为后续火星科学研究提供重要支撑, 我们在充分调研当前国际火

星沙尘暴研究的基础上, 提出我国应及早在火星同步轨道开展多点卫星观测, 建立自主的火星沙尘暴与天气监测体系, 从而对火星全球天气形成无间断的持续监测. 这对监测和预警火星沙尘暴, 监测火星空间环境、大气和表面地貌变化, 保障火星-地球通讯, 发展火星定位导航技术, 提升探测器数据存储和上传效率, 提高火星科学探测质量等都将具有十分重大的科学意义和工程价值.

1 火星沙尘暴概述

在18世纪早期就有人观测到火星大气及火星表面存在沙尘现象, 直到19世纪下叶人们才正式提出火星上的“黄色雾云”是由于沙尘引起的^[6-8]. 水手7号(Mariner 7)在1969年掠飞火星时, 其搭载的相机和红外光谱仪首次记录到了Hellas区域存在大气沙尘^[9,10]. 而人类第一颗环火星在轨飞船——水手9号(Mariner 9), 在1971年11月刚入轨火星的时候就记录到了一次火星全球沙尘暴(其搭载的红外干涉谱仪在9 μm 的波段显示出了由沙尘引起的强烈吸收特征^[11]). 后续的火星探测飞船, 如海盗1&2号环绕器(Viking Orbiters 1&2)、火星全球勘探者号(Mars Global Surveyor, MGS)、火星奥德赛号(Mars Odyssey)、火星快车(Mars Express)、火星勘测轨道器(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)等, 均搭载了多种相机和光谱仪对火星沙尘进行大量的在轨观测. 不少火星着陆器及巡视车, 如海盗1&2号着陆器、探路者号(Mars Pathfinder)、凤凰号(Phoenix)、机遇号(Opportunity)、勇气号(Spirit)等, 也通过可见光波段对局地火星沙尘活动做了大量观测. 尤其近20年来, 通过多颗环火飞船及火星表面(下文简称火表)探测器的观测, 人们累积了大量的火星沙尘活动观测数据^[12-14]. 其中, 利用MGS的热辐射光谱仪(thermal emission spectrometer, TES)、Odyssey的热辐射成像系统(thermal emission imaging system, THEMIS)和MRO的火星气候探测仪(Mars

climate sounder, MCS)在9.3 μm 的红外吸收谱, 可反演得到沙尘光学深度(column dust optical depth, CDOD), 进而可定量评估火星大气沙尘活动的强弱. CDOD越大说明火星大气沙尘含量越高. 利用公布的CDOD数据(http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/dust_climatology/), 我们在图1中展示了第24~35火星年期间(1998~2021年), CDOD随太阳经度(或火星季节)的平均变化特征.

由图1可见, 火星沙尘活动有典型的季节变化特征: $L_s \approx 0^\circ \sim 140^\circ$ 期间为火星非沙尘季节, 火星全球沙尘活动较弱; 而 $L_s \approx 140^\circ \sim 360^\circ$ 期间则为火星沙尘季节, 火星沙尘活动频发, 且较为剧烈^[15]. 需要注意的是, 也有人按 $L_s \approx 180^\circ \sim 360^\circ$ 来定义火星沙尘季节, 但这种定义容易忽略火星大气沙尘活动实际已经在 $L_s \approx 140^\circ \sim 180^\circ$ 期间开始增强的事实.

从时空尺度和形貌上而言, 火星沙尘活动可大体分为尘卷风(dust devils)及沙尘暴(dust storms)两个基本类型^[16]. 火星尘卷风是由大气热驱动形成的柱状涡旋, 其尺度从几米宽、几十米高到一公里宽、几公里高不等. 尘卷风虽然尺度小, 但是它广泛分布于火星表面. 在某些情况下, 尘卷风还会产生浅色或深色的表面余迹, 延伸数十到数千千米长. 相比尘卷风, 沙尘暴的规模在时空尺度上都要大得多.

沙尘暴从空间尺度上可分为局地沙尘暴(宽度<2000 km或面积<1.6 $\times 10^6$ km²)、区域沙尘暴(宽度>2000 km或面积>1.6 $\times 10^6$ km²)和全球沙尘暴^[17,18]. 局地沙尘暴在火星全球任何季节下都能观测到, 但主要集中在两极冰盖边缘、中纬区域, 及北半球一些高地的底部区域. 局地沙尘暴的产生可能与大气斜压波(baroclinic waves)和大气不稳定性相关^[19,20]. 部分局地沙尘暴可发展为区域沙尘暴^[18,20,21]. 区域沙尘暴主要发生在火星沙尘季节(南半球的春夏季节, 此时火星位于近日点附近)^[21]. 如图2所示, 起源于北半球的锋面沙尘暴(frontal dust storms)通过大气波动, 并经一些特殊的南北地

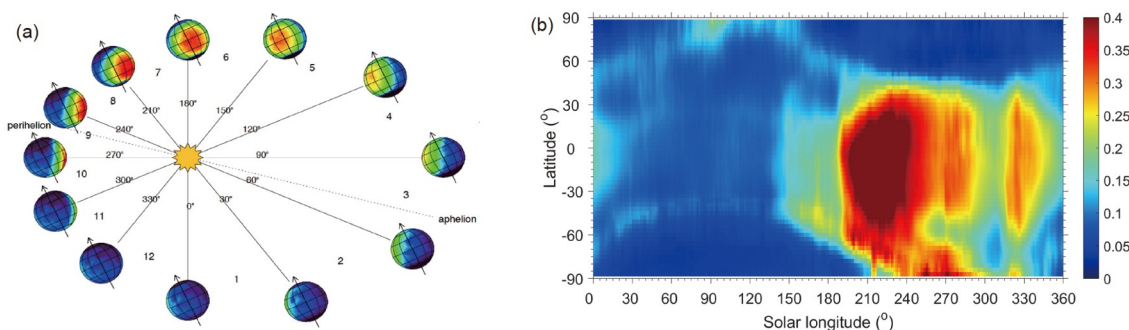


图1 沙尘光学厚度随太阳经度(Solar longitude, L_s)的变化分布. (a) 火星轨道的太阳经度变化(图片来源于http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/time/solar_longitude). (b) 在第24~35火星年期间, 大气压力面610 Pa处的CDOD随纬度和 L_s 变化的平均分布. 其中 $L_s = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$ 分布对应为北半球春分、夏至、秋分、冬至. $L_s \approx 0^\circ \sim 135^\circ$ 期间为火星非沙尘季节, 而 $L_s \approx 135^\circ \sim 360^\circ$ 期间则为火星沙尘季节

Figure 1 The distribution of column dust optical depth (CDOD) varied with Solar longitude (L_s). (a) The position of Mars at different solar longitudes (L_s) as well as the position of Mars around the Sun (image is from http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/time/solar_longitude). (b) The multi-annual and zonal average of CDOD over Mars year (MY) 24–35. The CDOD data are normalized to the pressure level of 610 Pa. The L_s values of $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$, and 270° correspond to the northern spring equinox, summer solstice, autumn equinox, and winter solstice, respectively

形通道,横越赤道进入南半球,发展为区域沙尘暴^[14,20,22,23].此外,在南极冰盖春夏消融期,南半球的一些盆地区域(如Argyre盆地、Hellas盆地)也会发展出一些区域沙尘暴^[16].而全球沙尘暴则是时间持续可长达几个月的全球性沙尘上扬事件,沙尘在此期间可上扬到80 km左右的高度^[24].图3展示了2001年7月火星发生全球沙尘暴时,MGS卫星观测到的沙尘暴前后火星全貌对比图.有研究认为,全球沙尘暴可能是由上扬的沙尘、大气加热及大气环流间耦合形成的正反馈效应所致^[16],也有人认为全球沙尘暴可能与火星公转轨道的角动量变化有关^[25].与区域沙尘暴不同,全球沙尘暴并不是每年沙尘季节都会产生.表1列出了近100年以来,人们观测到

的火星全球沙尘暴事件,图4则展示了这些全球沙尘暴时间随太阳经度的分布.由表1可见,全球沙尘暴的出现时间或周期并没有固定的规律.沙尘暴复杂的年际变化很可能是由沙尘、云、大气动力学过程、光化学过程等一系列物理化学过程的相互耦合引起的.

尽管目前我们对火星沙尘暴的一些基本规律已有大体认识,但是对火星沙尘及其相关物理过程的认识还存在很多不足.主要体现在如下几方面^[16,26,27]: (1) 什么机制维持了非沙尘季节火星大气中的背景沙尘,并抬升了沙尘的峰值高度; (2) 沙尘与水汽、二氧化碳之间的相互作用如何影响沙尘循环; (3) 近火表的风场及低空的大气物理过程究竟如何; (4)

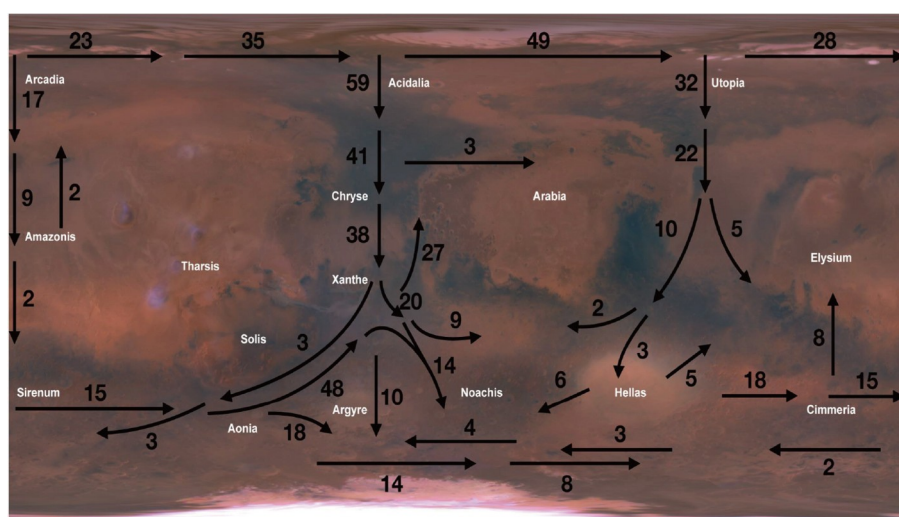


图2 MGS卫星及MRO卫星的轨道相机在24~32火星年期间观测到的火星沙尘活动序列事件的传播路径. 修改自文献[14]

Figure 2 The cameras onboard MGS and MRO observed paths of dust storm sequences observed during MY 24~32. Modified from the Ref. [14]

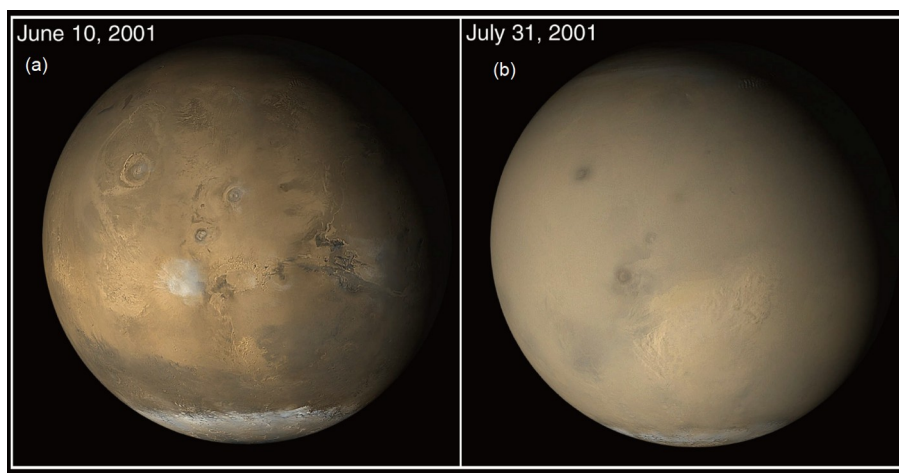


图3 MGS卫星轨道相机观测到的火星2001年7月全球沙尘暴的发展变化. (a) 沙尘暴前; (b) 沙尘暴期间. 图片来源于<https://mars.nasa.gov/resources/7886/dust-storms-of-2001/>

Figure 3 The Mars orbital camera system on MGS captured the development of a global dust storm in July 2001. (a) Before the storm; (b) amidst the storm. Source from <https://mars.nasa.gov/resources/7886/dust-storms-of-2001/>

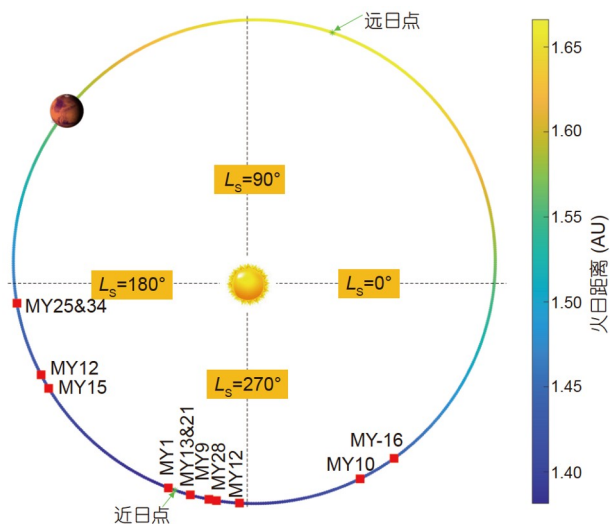


图4 近100年以来,观测到的火星全球沙尘暴事件在近日点附近的分布

Figure 4 The timing of observed global dust storms on Mars concentrates in the season near perihelion over the past century

表1 近100年来观测到的火星全球沙尘暴事件^[16,25]

Table 1 Observed global dust storms in the last century^[16,25]

地球年	火星年	$L_s(^{\circ})$
1924	-16	310
1956	1	249
1971~1972	9	260
1973	10	300
1977	12	204
1977	12	268
1979	13	255
1982	15	208
1994	21	254
2001	25	185
2007	28	262
2018	34	185

火星表面沙尘的分布如何; (5) 什么机制控制了沙尘暴的爆发、发展、及衰退, 其关键过程和反馈机制如何; (6) 什么机制控制了全球沙尘暴的年际变化; (7) 当前火星全球及各区域沙尘迁移、变化的“收支”如何, 对应的时间演化又如何。

2 沙尘暴效应

火星沙尘活动会引发诸多物理效应, 并会对火星着陆探测或载人登火带来一系列潜在危害。

(1) 对大气动力学的影响。在沙尘暴期间, 上扬到大气里的沙尘, 显著吸收了太阳辐射, 使得火星大气温度上升(在

25 km的高度温度至少上升 20°C)^[28,29], 导致火表温度下降, 并且火表的太阳紫外辐射水平也会显著降低。夜间火表温度在沙尘暴期间相对较高, 使得昼夜温差在沙尘暴期间显著降低^[30-32]。局部沙尘暴引发的大气变化会传播到远处, 并在短时间尺度内诱发其他地方的沙尘活动, 形成瞬态遥相关事件(transient teleconnection event)^[33]。沙尘的辐射效应会改变大气的热结构, 导致火星大气动力条件发生改变, 进一步影响大气潮汐波动、加强经向风场与火星Hadley环流^[34-37]。沙尘暴会进一步影响极区 CO_2 冰盖的升华和凝结^[38,39], 从而进一步改变极区大气压的变化。沙尘暴会提升水冰云层(water ice cloud)的高度^[40], 降低水汽向极区的输运^[41]。沙尘暴引起水汽向垂直高度和高纬输运, 并在中高层大气中使得水汽光解为一种能破坏臭氧的催化剂产物, 进而在全球沙尘暴期间对火星中高层大气中的臭氧造成全球破坏^[42]。此外, 沙尘活动与大气动力学间的相互作用也被认为在理解火星气候演化中发挥着非常重要的作用^[43]。过去的40亿年间, 大气沙尘的抬升和传输, 与大气环流子午向相互作用, 使得火星气候演化过程更为复杂。沙尘颗粒的尺寸对火星大气气候也有显著的调制影响^[36]。

(2) 对大气电学性质的影响。各种模拟、实验和计算表明, 在火星沙尘暴期间, 沙尘在强风带动下很容易产生摩擦起电, 并产生放电现象, 激发低频电磁扰动^[44-48]。观测表明, 火星沙尘区域有较为显著的微波辐射, 这很可能就是沙尘摩擦放电的证据^[49]。此外, 大气电导率可能与沙尘暴活动存在反相关。沙尘活动性越高, 越有助于大气中的气溶胶吸附大气离子, 使得大气电导率越低^[50,51]。

(3) 对空间环境的影响。观测和模拟表明, 低层大气的沙尘活动可通过大气相互耦合作用显著影响火星中高层大气、电离层及磁层。沙尘暴期间, 低层大气温度显著上升引起高层大气中 CO_2 密度显著提升^[52,53]。对应的电离层峰高也会在沙尘暴期间抬升几十公里, 但电子峰值密度变化不大^[54-56]。沙尘暴期间, 至少在170~500 km高度范围内, 不同大气离子的变化响应也不尽相同, CO_2^+ 的密度会显著增强, O^+ 的密度则出现了下降, 而 O_2^+ 则基本变化不大或出现增强^[54,57,58]。沙尘活动能增大中层大气中(高度为40~100 km)的水汽丰度, 水汽会被输运到100 km以上的高度^[59], 进一步导致了H的逃逸损失量在沙尘暴期间提高5~10倍^[60-62]。沙尘引起的扰动能从电离层传入磁层, 使得 CO_2^+ 的逃逸率在沙尘期间增大3倍^[54]。

(4) 对地形地貌的影响。沙尘暴会影响两极冰盖的沙尘沉积^[63]以及挥发物质(如冰/雪)的沉积^[64], 这会严重影响对火星气候演化历史的分析。此外, 沙尘暴能驱动火表沙尘再分布, 带来的强风(风速可达100 km/h)对地形、地貌演化和重塑有重要作用^[65]。此外, 沙尘暴也有利于暴露火表尘土中未被宇宙射线降解的有机物, 这有助于评估火表尘土中是否存在生命信号^[66]。

(5) 对火星探测或载人登火的影响。观测表明火星沙尘颗

粒尺度范围在0.1~2000 μm 之间, 颗粒呈板状、棱角状及圆形等, 颗粒密度为2.6~3.0 g/cm^3 ^[67], 沙尘颗粒具有磁性^[68], 富含Si、Al、Fe、Mg、Ca、Ti、S、Cl和Br等元素^[69]. 这些微小沙尘颗粒可覆盖探测器表面, 或渗入探测仪器, 引发机械故障并影响相关硬件工作. 大量研究和报道表明, 沙尘活动会造成火星车太阳能电池损伤^[70], 沙尘覆盖影响火星车太阳能电池板的工作效率^[5]. 此外, 观测发现火壤含有铬(六价铬离子有剧毒), 并富含硫、氯等元素. 所以, 火星沙尘可能具有毒性和酸性, 对航天员的健康构成巨大威胁^[71]. 沙尘暴期间, 大气温度、压力、风速等有快速变化, 再加上近火表面的大气湍动过程, 这会对火星着陆器的着陆过程和离飞过程构成巨大的潜在威胁^[72]. 此外, 沙尘活动引发的摩擦放电、电磁干扰等也能对探测器工作、航天员舱外活动、电磁通讯等带来一系列潜在危害^[73,74].

3 沙尘暴预报现状

相比地球大气, 火星大气的混浊性/无序性较弱^[75-78], 因而相对地球而言, 火星大气状态的可预测性较高^[79]. 因此, 沙尘一旦上扬到大气中后, 根据火星的大气环流和沙尘传输通道(图2)预测沙尘的传输和演化要相对容易. 然而, 由于我们对火星沙尘暴的观测不足, 物理认识还严重缺乏, 要确切预测什么时候发生沙尘暴目前还是比较困难的^[15,80,81]. 这主要表现在如下几个方面: (1) 对火星沙尘上扬、注入大气的机理还缺乏深入认识; (2) 对火星沙尘源区沙尘“源与汇”的时间变化过程还缺乏认识; (3) 对从低空边界层上扬注入的沙尘颗粒大小的认识也很粗糙, 沙尘颗粒对研究沙尘对大气热和风结构的反馈效应至关重要; (4) 对沙尘的辐射及动力学反馈物理过程的理解也还不足, 这对理解局部沙尘暴在短时间内是如何演化为区域沙尘暴并最终演变成全球性的沙尘暴也带来了困难.

目前, 预测局地沙尘暴和区域沙尘暴的发生都比较困难, 那么以当前的知识来预报火星全球沙尘暴的发生就更困难了. 预报全球沙尘暴发生的困难点在于: (1) 发展为全球沙尘暴的局地或区域性沙尘暴并没有显著的区域分布特征; (2) 尽管全球沙尘暴事件看起来主要集中在南半球的春分至夏至时段出现(图4), 但是全球沙尘暴并不倾向于某个特定的太阳经度范围内出现; (3) 相继两次全球沙尘暴事件的间隔也不固定(表1); (4) 全球沙尘暴事件前兆时期的背景沙尘分布和强度与非全球沙尘暴时期的非常相似. 所以仅从监测的沙尘光学厚度(如CDOD)来预报沙尘暴的出现和发展是远远不够的, 必须要把大气压强、温度、风场等信息结合起来.

尽管当前准确预测火星沙尘暴的发生还比较困难, 但利用飞船记录的海量沙尘历史观测数据, 我们可以从概率上获得沙尘暴出现的时空规律. 如图1所示, 利用CDOD历史数据, 我们至少可以发现, 火星沙尘活动的出现在地理位置和火星季节方面有一定的分布规律. 有学者根据CDOD的历史数据

评估分析了欧洲太空局(简称欧空局)的火星着陆器(Schiaparelli)着陆时的沙尘变化分布^[81]. 魏勇等人^[82]利用CDOD历史数据评估了我国祝融号火星车在2022年期间经历沙尘暴的变化趋势.

还有一种比较可行的预报方式, 即采用数据同化(data assimilation)——结合所有可用的观测信息和数值模型来对火星大气作最佳估计. 因此, 同化可以被视为一种考虑了火星大气系统动力学和热力学之后的最优时空插值/外推数值模型. 基于地球大气数据同化研究, 当前火星大气数据同化研究技术主要集中在张弛逼近(nudging)^[83]和集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filtering)^[84]两方面. 然而这些研究技术对预测沙尘暴而言, 还远远不够成熟. 除了本身的模式偏差(model bias), 另一个主要原因就是, 它们的底层模型并没有将沙尘上扬作较为准确的参数化. 而沙尘一旦上扬进入大气中并被全球环流输送, 那么将温度和气溶胶的观测数据同化后, 便可以提前数天预测沙尘暴的演变. 然而, 由于沙尘的上扬并注入大气的机制比较复杂^[85,86], 并且缺乏连续的卫星气象观测, 短时间内发展出有效的同化模型工具来预测火星沙尘暴是极具挑战的^[87].

4 在轨监测沙尘暴的必要性

如上所述, 火星沙尘暴的产生和演化机理还比较复杂, 因而无论是物理过程还是预报模式, 我们都还需开展大量的工作. 为了预警火星真实沙尘活动, 加快保障我国未来火星表面的探测任务, 当前唯一可行的手段则是对火星实施持续、大范围的在轨卫星监测. 值得注意的是, 20世纪70年代人类就实现了通过同步轨道卫星对地球天气进行监测和预报. 随着人类探索火星的不断深入, 各种火星探测任务的开展和规划, 如火星探测器着陆、火星车巡视探测、采样返回乃至载人登火等, 我们对火星天气预报的需求越来越迫切, 尤其是对火星沙尘暴的监测和预报.

有学者研究了我国火星采样返回任务的轨道方案^[88], 研究结果表明, 就霍曼转移轨道而言, 我国在2028年前后将有3次向火星发射飞船的最佳窗口时间(表2). 对应这3次发射窗口, 飞船抵达火星的时候正好赶上火星沙尘季节($135^\circ < L_s < 360^\circ$). 倘若此时在环火星轨道上能有卫星对沙尘提供连续且大范围的监测和预警, 那么我们可以灵活应对沙尘暴的威胁——选择合适的时间和地点择机着陆采样舱. 尤其未来若

表2 向火星发射飞船的最佳时间窗口

Table 2 The optimal intervals for launching spacecraft to Mars

地球发射日期	抵火星日期	抵火星时的 L_s 范围
2026年11月	2027年8月	139.1°~154.3°
2028年11月	2029年10月	195.9°~213.9°
2031年1月	2031年10月	222.0°~240.8°

有多颗卫星在火星同步轨道高度上运转,将能大范围、持续地监测和预警火星天气状况、表面沙尘活动,为保障火星相关的科学探测任务提供有力支撑。

欧空局于2021年发布了面向2035~2050年的《远航2050 (Voyage 2050)空间科学项目》白皮书^[89](<https://www.cosmos.esa.int/web/voyage-2050/white-papers>)。白皮书显示,欧洲在未来还将继续实施火星探测计划,包括开展火星气候演化探测研究、火星极区科学探测^[90]、火星地下生命探测以及火星空间等离子体多点探测^[91]。这些探测计划研究对象涉及火星空间、大气、冰盖、土壤、地形地貌等,而除了传统的卫星绕飞外,探测手段也包括了火星着陆器的着陆探测,这些探测任务毫无疑问都与火星沙尘暴有着密切的关系。

美国宇航局联合美国自然科学基金会于2022年4月发布了《2023~2032年行星科学和天体生物学十年研究计划》白皮书(<https://baas.aas.org/vol-53-issue-4>)。在征集到的白皮书里,美国提出了多达近50项与火星研究相关的科学项目,其中多项白皮书计划都将火星沙尘研究及火星沙尘暴预报列为了重要的研究项目^[27,92~98]。有白皮书指出,美国未来应对火星沙尘的分布和演化需要有持续的轨道监测^[27]。而有白皮书甚至提出,应该在火星同步轨道上布置多点卫星,对火星天气及沙尘暴的发展和演化形成无间断的持续监测^[96]。在美国宇航局基金资助下, Montabone等人^[99,100]还提出了在火星同

步轨道实施多颗小卫星监测火星大气及沙尘暴的概念探测计划,以支撑后续火星采样和火星表面探测任务等。

可以预见,在未来国际火星科学探测中,开展火星沙尘暴的卫星监测和预警将具有十分重要的战略意义。我国也应抓紧论证和实施火星沙尘暴的卫星监测,服务并保障我国“天问三号”——火星采样返回任务,同时也能为人类探索火星提供重要的科学和工程服务平台。

5 在轨监测沙尘暴的方案和优势

我国应尽早火星同步轨道处对火星沙尘活动实施多点卫星监测。火星同步轨道的高度为17031.5 km,距离火星中心约6个火星半径^[101]。图5展示了在赤道同步轨道上某点卫星对火星观测的视场范围。可见,一颗卫星可以在经纬面上很好地覆盖距星下点(火星-卫星连线与火星表面的交点)60°之内的区域。所以,倘若在赤道同步轨道处均匀放置至少3颗卫星(形成等边三角形,方位角彼此间隔120°),那么就可对火星中低纬区域形成连续、不间断的监测。

此外,探测火星大气对认识火星大气循环及大气风场变化,研究地形地貌演化、大气环流、沙尘、气溶胶传输、大气物理过程等具有重要的科学意义,而且也有利于保障未来火星探测工程的顺利实施,如降低着陆器着陆及离飞风险。虽然一些火星着陆器给出了零星、局地的火表温度、压

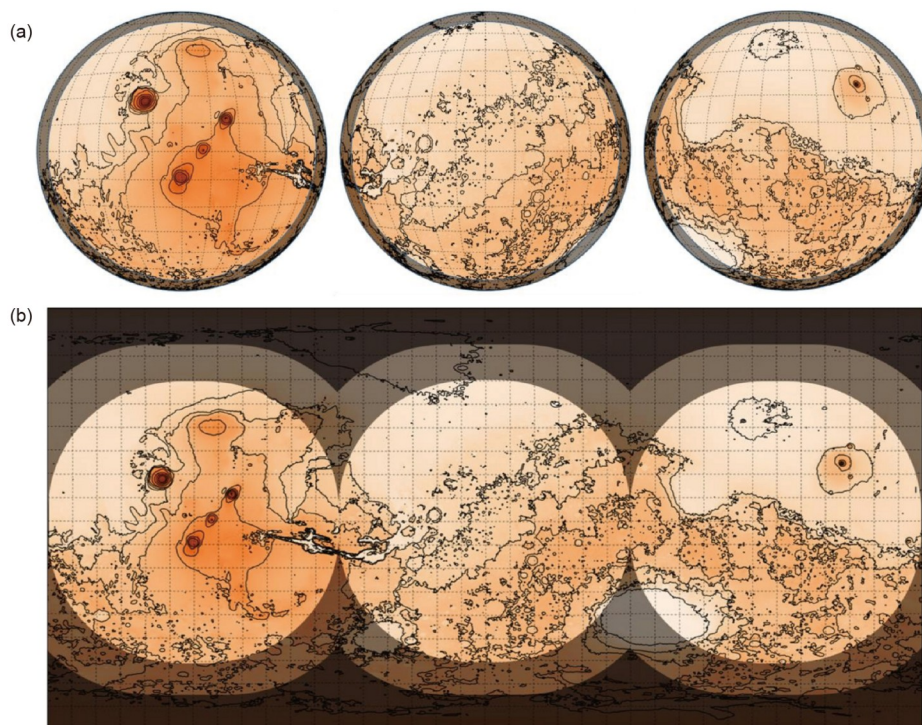


图5 3颗火星赤道同步轨道卫星对火星表面的空间视场(a),及其在等量矩形投影面上的展示(b)。灰色区域为偏离星下点大于60°的区域,而黑灰色区域为偏离星下点大于75°的区域(很难或不能观测到的区域)。修改自文献^[81]

Figure 5 The sight views of three aerostationary spacecraft (a) and the equivalent equirectangular projection of Mars topographic contours (b). The light grey band starts at 60° emergence angle; the dark grey one starts at 75° (poorly or not observed regions). Modified from the Ref. ^[81]

强、风场等数据,但我们对火星全球大气的物理特性,尤其是低高度的大气物理参数是完全不清楚的.火星大气经验模型虽可得到火表附近的大气参数,但大气模型也没有完全得到过证实,计算得到的风速和方向的准确度也有待验证.这极大限制了我们对火星沙尘暴的物理过程,并对建立其经验预报模型带来困难.因此,为扩大高纬区的沙尘暴监测,并同时兼顾火星大气探测和极区潜在生命环境探测,我们建议应该安排至少一颗卫星沿大椭圆极轨轨道监测火星沙尘暴,并对火星低空大气及两极地貌、冰盖等开展科学探测.我们建议极轨轨道近火点在150 km左右,且近火点位置随轨道进动可基本覆盖火星整个表面,极轨轨道周期约为4 h.与MGS和MRO的轨道相比(MGS和MRO的轨道皆为太阳同步轨道,地方时覆盖范围非常有限),大椭圆极轨卫星轨道在地方时和高度范围都可以获得较大程度的覆盖,不仅可在较短时间内对两极形成快速监测,而且在近火点附近又可对低层大气及火星地形地貌等实现较高分辨的轨道测量.

这样,如图6所示,整个卫星星座应至少包括赤道同步轨道处的3颗卫星及1颗大椭圆极轨卫星,可形成“四点一体”的火星全球天气监测组网.

这样的多卫星监测组网在火星科学探测和工程应用上具有十分重要的战略意义,至少具有如下优势.(1) 可持续监测和预警火星全球天气状况.对火星全球大气天气状况包括沙尘暴、水汽/CO₂冰云,及其演化等可形成持续不间断的全球同步监测.并对火星大气风场、温度等大气物理特性形成高时空分辨的持续测量.(2) 可持续监测火星表面环境.可对火星表面温度日变化、反照度、浅表层的沙层岩石、地形地貌、水冰日夜变化、表面沙尘的移动变化等形成持续监测.(3) 可持续监测上游太阳风条件和火星空间环境.由于同步轨道高度在上游弓激波外,所以星座组网可对火星上游太阳风形成持续监测,为实现火星空间天气监测和预报提供重要基础.并且卫星组网在空间不同区域,可对磁层边界层、

空间电流、等离子体输运及对太阳风的响应等物理过程实现多点同步观测研究.利用星座卫星之间的电磁通讯,还可开展星-星掩星探测,获得较高精度的火星电离层/大气等离子体分布信息等.(4) 可持续观测火星天然卫星地形地貌.同步轨道高度正好位于火卫一(Phobos,距火星约9500 km)与火卫二(Deimos,距火星约23000 km)之间.星座卫星可对这两颗星体的热物理和光谱特征,包括热惯量、表面矿物特征、表面粗糙度、表面颗粒大小等作持续观测分析.(5) 可大幅提高火星探测器的通讯效率.火星同步轨道卫星可充当中继星的角色,大大提高未来火表探测器或载人登火的通讯效率.例如,美国好奇号火星车每天仅有两次很短的时间(每次10 min)与MRO通讯,上传的数据大小受通讯时段限制.而当同步轨道卫星充当中继星后,火表探测器可随时通过同步卫星与地球指挥站取得联系,实现随时接收或发送数据.假若同步卫星平台携带了一个大的通信负载,那么也可对几个低空卫星实现通讯共享平台,从而最大限度地减少它们的通讯成本.(6) 提供数据存储和处理的功能.火星同步轨道卫星可充当“母星”的功能,对火表探测器采集的数据,包括图片、地震、雷达、光谱等,提供大容量的数据存储和处理功能,有效降低火表探测器的计算和存储损耗,提高科学探测质量.(7) 提供导航功能.多颗火星同步轨道卫星可对未来火星探测任务,尤其火表巡视车,提供准确的实时导航功能,保障火星探测任务的顺利实施.

6 在轨搭载载荷

聚焦监测火星沙尘活动并与国际火星沙尘数据资料形成继承,对我国4颗卫星监测组网而言,我们建议每颗卫星均需搭载:(1) 多波段彩色相机,形成大视场多波段光学相机成像,监测火星全球沙尘活动状态;(2) 热辐射光谱仪或红外光谱仪,利用卫星红外光谱仪的吸收谱定量获取沙尘光学厚度.值得注意的是,红外光谱仪还可通过某些谱线来探测火星大

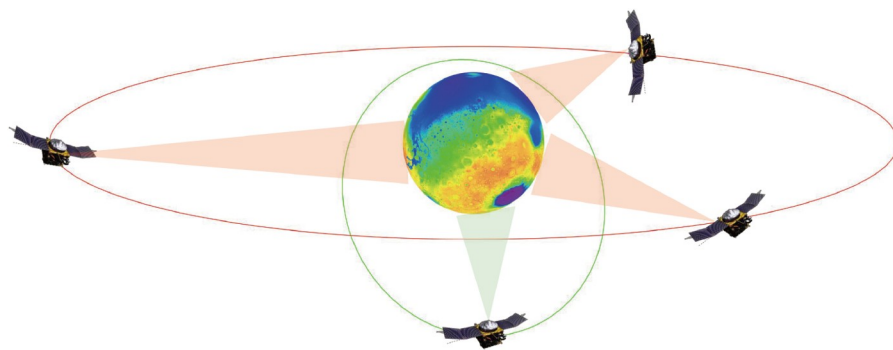


图6 多点卫星监测火星天气示意图. 3颗卫星均匀(互相隔120°)置于火星赤道同步轨道高度(红线),另一颗卫星沿大椭圆极轨轨道(绿线)
Figure 6 The diagram shows the constellation of spacecraft for monitoring the atmospheric weather of Mars. The constellation is composed of three spacecraft in the aerostationary orbit (red line) with locations separated by 120° in longitude, and one spacecraft in a large elliptical polar orbit (green line)

气中的CO₂、水汽等^[102](例如MRO搭载的MCS)。

对于探测火星大气风场数据^[94],我们建议还需在极轨卫星上搭载:(1)激光雷达——通过测量大气沙尘或气溶胶的多普勒频移来获取火星大气风场数据。该仪器特别适用于沙尘暴期间的探测,可获取0~40 km高度范围内的风场数据。我们也注意到,星载激光雷达在探测地球沙尘天气方面技术已经很成熟^[103],所以激光雷达对火星沙尘天气探测具有一定可行性。(2)亚毫米临边遥感仪——通过视线多普勒频移及亚毫米红外谱线来推测风场。该仪器测量不受沙尘暴影响,可测量10~100 km高度范围内的风场。(3)多普勒风场温度探测仪——通过测量火星临边发射的多种光谱特征,如O₂(a¹Δ_g) 1.27 μm近红外波段和O(1S) 557.7 nm可见光波段的气辉辐射等,利用各自精密测量技术鉴别光谱的多普勒频移和线宽信息,以推断火星大气风场和动力学温度等重要参数^[104]。

当然,若还需考虑其他科学探测内容,那么卫星可依具体需求搭载其他相关科学仪器。目前我们仅提出关于监测火星大气及沙尘暴多卫星组网的初步方案和建议。该方案的科学性和可行性还需联合国内相关科研、工程人员的集体力量作进一步深入论证。具体搭载的科学载荷、仪器重量、工作模式、功耗等也需进一步与深空探测工程部门进行深入论证,提出切实可行的探测和搭载方案,以期能早日实现服务国家火星探测的战略需求。

7 结语

当前国际火星探测如火如荼,世界各国未来还会竞相对

火星开展各种探测任务,火星探测也将向多卫星探测形式过渡^[105]。我国深空探测和行星科学虽然起步晚,但近些年来发展迅猛^[106~113]。我国“天问一号”对火星一次性圆满完成了“绕、落、巡”的工程探测任务目标^[114,115],实现了我国深空探测从地月系向太阳系探测的跨越,使我国成为继美国之后世界第二个具备火星登陆能力的国家。我国后续还将实施“天问三号”——火星采样返回任务。截至目前,还没有任何一个国家或地区实现火星采样返回,倘若任务能成功完成,那我国的行星科学与深空探测将会达到一个新的历史高度。

如何监测和预警火星沙尘暴及火星天气变化,保障后续火星表面探测任务的顺利进行则成为一道摆在人类面前的难题。值得注意的是,为保障美国宇航局与欧空局在2030年前后将实施的火星采样返回任务(<https://mars.nasa.gov/msr/#Overview>),目前美国宇航局已经开始着手论证火星同步轨道监测火星沙尘暴的可行性^[99,100]。鉴于火星同步轨道在科学和工程上的诸多优势,火星同步轨道未来必将成为火星探测的“战略”高地。因此,我国也应尽早在火星同步轨道布局多点卫星监测,为我国火星采样返回任务保驾护航,也为人类探索火星贡献中国力量。

此外,为加强火星沙尘暴监测,我们还需加大地面设施对火星的监测。我国首个地基行星遥感中心——冷湖行星地质观测中心已建成运行^[116],可通过地面望远镜实现对火星表面的光学监测。需要建立专门的实验模拟装置^[117,118],研究不同成分、大小的沙尘颗粒在不同物理条件下与风的相互作用过程,进而深入研究火星沙尘暴产生的物理机制。

致谢 感谢国家自然科学基金(41922031)、中国科学院A类战略性先导科技专项(XDA17010201)、中国科学院重点部署项目(ZDBS-SSW-TLC00103)、中国科学院地质与地球物理研究所重点部署项目(IGGCAS-201904, IGGCAS-202102)和中国科学院青年创新促进会(Y2021027)资助。

推荐阅读文献

- Schmidt F, Way M J, Costard F, et al. Circumpolar ocean stability on Mars 3 Gy ago. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2022, 119: e2112930118
- Cazaux C, Naderi F, Whetsel C, et al. The NASA/CNES Mars sample return—A status report. *Acta Astronaut*, 2004, 54: 601–617
- Green J L. Interdisciplinary research in terraforming Mars: State of the profession and programmatic. *Bull AAS*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.0408ed8f>
- Information Office of the State Council of the People's Republic of China. China's Spaceflight in 2021 (in Chinese). Beijing: People's Publishing House, 2022 [中华人民共和国国务院新闻办公室. 2021中国的航天. 北京: 人民出版社, 2022]
- Wang Y Q, Wei Y, Fan K, et al. The impact of dust storms on Mars surface rovers: Review and prospect (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 368–379 [王誉祺, 魏勇, 范开, 等. 沙尘暴对火星表面探测器的影响: 回顾与展望. 科学通报, 2023, 68: 368–379]
- McKim R J. Meeting contribution: Recent views of Mars. *J Br Astron Assoc*, 1999, 109: 287
- Douglass A E. Mars. *Popul Astron*, 1899, 7: 113–117
- Antoniadi E M. Section for the Observation of Mars (1909). *Mem Br Astron Assoc*, 1915, 20: 25–92
- Leovy C B, Smith B A, Young A T, et al. Mariner Mars 1969: Atmospheric results. *J Geophys Res*, 1971, 76: 297–312
- Herr K C, Forney P B, Pimentel G C. Mariner Mars 6/7 Infrared Spectrometers: Lab simulation of Mars spectra. In: 29th Annual Lunar and Planetary Science Conference. 1998. 1518

- 11 Conrath B J. Thermal structure of the Martian atmosphere during the dissipation of the dust storm of 1971. *Icarus*, 1975, 24: 36–46
- 12 Montabone L, Forget F, Millour E, et al. Eight-year climatology of dust optical depth on Mars. *Icarus*, 2015, 251: 65–95
- 13 Montabone L, Spiga A, Kass D M, et al. Martian Year 34 column dust climatology from Mars Climate Sounder observations: Reconstructed maps and model simulations. *JGR Planets*, 2020, 125: e2019JE006111
- 14 Battalio M, Wang H Q. The Mars Dust Activity Database (MDAD): A comprehensive statistical study of dust storm sequences. *Icarus*, 2021, 354: 114059
- 15 Forget F, Montabone L. Atmospheric dust on Mars: A review. In: 47th International Conference on Environmental Systems. 2017. ICES-2017-175
- 16 Kahre M A, Murphy J R, Newman C E, et al. The Mars dust cycle. In: Haberle R M, Clancy R T, Forget F, et al., eds. *The Atmosphere and Climate of Mars*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. 295–334
- 17 Martin L J, Zurek R W. An analysis of the history of dust activity on Mars. *J Geophys Res*, 1993, 98: 3221–3246
- 18 Cantor B A, James P B, Caplinger M, et al. Martian dust storms: 1999 Mars Orbiter Camera observations. *J Geophys Res*, 2001, 106: 23653–23688
- 19 James P B, Hollingsworth J L, Wolff M J, et al. North polar dust storms in early spring on Mars. *Icarus*, 1999, 138: 64–73
- 20 Wang H, Zurek R W, Richardson M I. Relationship between frontal dust storms and transient eddy activity in the northern hemisphere of Mars as observed by Mars Global Surveyor. *J Geophys Res*, 2005, 110: E07005
- 21 Cantor B A. MOC observations of the 2001 Mars planet-encircling dust storm. *Icarus*, 2007, 186: 60–96
- 22 Wang H, Richardson M I, Wilson R J, et al. Cyclones, tides, and the origin of a cross-equatorial dust storm on Mars. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1488
- 23 Wang H. Dust storms originating in the northern hemisphere during the third mapping year of Mars Global Surveyor. *Icarus*, 2007, 189: 325–343
- 24 Clancy R T, Wolff M J, Whitney B A, et al. Extension of atmospheric dust loading to high altitudes during the 2001 Mars dust storm: MGS TES limb observations. *Icarus*, 2010, 207: 98–109
- 25 Shirley J H. Solar system dynamics and global-scale dust storms on Mars. *Icarus*, 2015, 251: 128–144
- 26 Wu Z, Li T, Heavens N G, et al. Earth-like thermal and dynamical coupling processes in the Martian climate system. *Earth-Sci Rev*, 2022, 229: 104023
- 27 Newman C E. Toward more realistic simulation and prediction of dust storms on Mars. *Bull AAS*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfef.726b0b65>
- 28 Fenton L K, Geissler P E, Haberle R M. Global warming and climate forcing by recent albedo changes on Mars. *Nature*, 2007, 446: 646–649
- 29 Kass D M, Schofield J T, Kleinböhl A, et al. Mars climate sounder observation of Mars' 2018 global dust storm. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL083931
- 30 Guzewich S D, Lemmon M, Smith C L, et al. Mars Science Laboratory observations of the 2018/Mars year 34 global dust storm. *Geophys Res Lett*, 2019, 46: 71–79
- 31 Smith M D, Guzewich S D. The Mars global dust storm of 2018. In: 49th International Conference on Environmental Systems. 2019. ICES-2019-181
- 32 Viúdez-Moreiras D, Newman C E, De La Torre M, et al. Effects of the MY34/2018 global dust storm as measured by MSL REMS in Gale crater. *J Geophys Res Planets*, 2019, 124: 1899–1912
- 33 Martínez-Alvarado O, Montabone L, Lewis S R, et al. Transient teleconnection event at the onset of a planet-encircling dust storm on Mars. *Ann Geophys*, 2009, 27: 3663–3676
- 34 Wilson R J, Hamilton K. Comprehensive model simulation of thermal tides in the Martian atmosphere. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 1290–1326
- 35 Haberle R M, Pollack J B, Barnes J R, et al. Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA Ames General Circulation Model: 1. The zonal-mean circulation. *J Geophys Res Planets*, 1993, 98: 3093–3123
- 36 Wang Y, Chow K, Xiao J, et al. Effect of dust particle size on the climate of Mars. *Planet Space Sci*, 2021, 208: 105346
- 37 Wu Z, Li T, Zhang X, et al. Dust tides and rapid meridional motions in the Martian atmosphere during major dust storms. *Nat Commun*, 2020, 11: 614
- 38 Bonev B P, Hansen G B, Glenar D A, et al. Albedo models for the residual south polar cap on Mars: Implications for the stability of the cap under near-perihelion global dust storm conditions. *Planet Space Sci*, 2008, 56: 181–193
- 39 Zhao Y, Zhong L, Yuan R, et al. Simulation of Martian dust effects on polar CO₂ ice caps and atmospheric circulation using the MarsWRF model. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e2021JE006937
- 40 Stcherbinine A, Vincendon M, Montmessin F, et al. Martian water ice clouds during the 2018 global dust storm as observed by the ACS-MIR channel onboard the trace gas orbiter. *J Geophys Res Planets*, 2020, 125: e2019JE006300
- 41 Pankine A A, Tamppari L K. MGS TES observations of the water vapor in the Martian southern polar atmosphere during spring and summer.

- Icarus, 2019, 331: 26–48
- 42 Daerden F, Neary L, Wolff M J, et al. Planet-wide ozone destruction in the middle atmosphere on Mars during global dust storm. *Geophys Res Lett*, 2022, 49: e2022GL098821
 - 43 Leovy C. Weather and climate on Mars. *Nature*, 2001, 412: 245–249
 - 44 Krauss C E, Horanyi M, Robertson S. Experimental evidence for electrostatic discharging of dust near the surface of Mars. *New J Phys*, 2003, 5: 70
 - 45 Merrison J, Jensen J, Kinch K, et al. The electrical properties of Mars analogue dust. *Planet Space Sci*, 2004, 52: 279–290
 - 46 Melnik O, Parrot M. Electrostatic discharge in Martian dust storms. *J Geophys Res*, 1998, 103: 29107–29117
 - 47 Farrell W M, Kaiser M L, Desch M D, et al. Detecting electrical activity from Martian dust storms. *J Geophys Res*, 1999, 104: 3795–3801
 - 48 Farrell W M, Desch M D, Kaiser M L, et al. Radio and optical detection of Martian dust storm discharges. *Acta Astronaut*, 2000, 46: 25–36
 - 49 Renno N O, Wong A S, Atreya S K, et al. Electrical discharges and broadband radio emission by Martian dust devils and dust storms. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 2140
 - 50 Michael M, Tripathi S N. Effect of charging of aerosols in the lower atmosphere of Mars during the dust storm of 2001. *Planet Space Sci*, 2008, 56: 1696–1702
 - 51 Haider S A, Sheel V, Smith M D, et al. Effect of dust storms on the D region of the Martian ionosphere: Atmospheric electricity. *J Geophys Res*, 2010, 115: A12336
 - 52 McDunn T L, Bougher S W, Murphy J, et al. Simulating the density and thermal structure of the middle atmosphere (80–130 km) of Mars using the MGCM–MTGCM: A comparison with MEX/SPICAM observations. *Icarus*, 2010, 206: 5–17
 - 53 Chaufray J Y, Chaffin M, Deighan J, et al. Effect of the 2018 Martian global dust storm on the CO₂ density in the lower nightside thermosphere observed from MAVEN/IUVS Lyman-Alpha absorption. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL082889
 - 54 Fang X, Ma Y, Lee Y, et al. Mars dust storm effects in the ionosphere and magnetosphere and implications for atmospheric carbon loss. *J Geophys Res Space Phys*, 2020, 125: e2019JA026838
 - 55 Mukundan V, Thampi S V, Bhardwaj A, et al. Impact of the 2018 Mars global dust storm on the ionospheric peak: A study using a photochemical model. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e2021JE006823
 - 56 Wang J S, Nielsen E. Behavior of the Martian dayside electron density peak during global dust storms. *Planet Space Sci*, 2003, 51: 329–338
 - 57 Niu D D, Cui J, Wu S Q, et al. Species-dependent response of the Martian ionosphere to the 2018 global dust event. *J Geophys Res Planets*, 2021, 126: e2020JE006679
 - 58 Qin J, Zou H, Lee Y, et al. Effect of the 2018 Martian global dust storm on the main species in the upper ionosphere: Observations and simulations. *J Geophys Res Planets*, 2022, 127: e2022JE007297
 - 59 Aoki S, Vandaele A C, Daerden F, et al. Water vapor vertical profiles on Mars in dust storms observed by TGO/NOMAD. *J Geophys Res Planets*, 2019, 124: 3482–3497
 - 60 Stone S W, Yelle R V, Benna M, et al. Hydrogen escape from Mars is driven by seasonal and dust storm transport of water. *Science*, 2020, 370: 824–831
 - 61 Chaffin M S, Kass D M, Aoki S, et al. Martian water loss to space enhanced by regional dust storms. *Nat Astron*, 2021, 5: 1036–1042
 - 62 Heavens N G, Kleinböhl A, Chaffin M S, et al. Hydrogen escape from Mars enhanced by deep convection in dust storms. *Nat Astron*, 2018, 2: 126–132
 - 63 Hvidberg C S, Fishbaugh K E, Winstrup M, et al. Reading the climate record of the Martian polar layered deposits. *Icarus*, 2012, 221: 405–419
 - 64 Colaprete A, Barnes J R, Haberle R M, et al. Albedo of the south pole on Mars determined by topographic forcing of atmosphere dynamics. *Nature*, 2005, 435: 184–188
 - 65 Golombek M P, Warner N H, Ganti V, et al. Small crater modification on Meridiani Planum and implications for erosion rates and climate change on Mars. *J Geophys Res Planets*, 2014, 119: 2522–2547
 - 66 Farley K A, Malespin C, Mahaffy P, et al. *In situ* radiometric and exposure age dating of the Martian surface. *Science*, 2013, 343: 1247166
 - 67 Matijevic J R, Crisp J, Bickler D B, et al. Characterization of the Martian surface deposits by the Mars Pathfinder Rover, Sojourner. *Science*, 1997, 278: 1765–1768
 - 68 Hviid S F, Madsen M B, Gunnlaugsson H P, et al. Magnetic properties experiments on the Mars Pathfinder lander: Preliminary results. *Science*, 1997, 278: 1768–1770
 - 69 Rieder R, Economou T, Wanke H, et al. The chemical composition of Martian soil and rocks returned by the mobile alpha proton X-ray spectrometer: Preliminary results from the X-ray mode. *Science*, 1998, 278: 1771–1774
 - 70 McMillon-Brown L, Peshek T J, Pal A M, et al. A study of photovoltaic degradation modes due to dust interaction on Mars. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2021, 221: 110880
 - 71 Levine J S. Dust in the atmosphere of Mars and its impact on human exploration: Defining the problems. In: Levine J S, Kerschmann R L,

- Winterhalter D, eds. Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration. Newcastle upon Tyne: Cambridge Scholars Publishing, 2021. 1–21
- 72 Chen A, Vasavada A, Cianciolo A, et al. Atmospheric risk assessment for the Mars Science Laboratory Entry, Descent, and Landing system. In: 2010 IEEE Aerospace Conference. New York: IEEE, 2010. 1–12
- 73 Hansen D M, Sue M K, Ho C M, et al. Frequency bands for Mars *in-situ* communications. In: 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings. New York: IEEE, 2001. 1195–1208
- 74 Hang S, Tang X, Li H, et al. Potential application of X-ray communication in Martian dust storm. *Acta Astronaut*, 2020, 166: 277–289
- 75 Newman C E, Read P L, Lewis S R. Investigating atmospheric predictability on Mars using breeding vectors in a general-circulation model. *Q J R Meteorol Soc*, 2004, 130: 2971–2989
- 76 Greybush S J, Kalnay E, Hoffman M J, et al. Identifying Martian atmospheric instabilities and their physical origins using bred vectors. *Q J R Meteorol Soc*, 2013, 139: 639–653
- 77 Rogberg P, Read P L, Lewis S R, et al. Assessing atmospheric predictability on Mars using numerical weather prediction and data assimilation. *Q J R Meteorol Soc*, 2010, 136: 1614–1635
- 78 Smith M D. Interannual variability in TES atmospheric observations of Mars during 1999–2003. *Icarus*, 2004, 167: 148–165
- 79 Read P L, Lewis S R, Moroz I M, et al. Atmospheric predictability of the Martian atmosphere: From low-dimensional dynamics to operational forecasting? In: Second Workshop on Mars Atmosphere Modelling and Observations. 2006
- 80 Montabone L, Forget F. Forecasting dust storms on Mars: A short review. In: Workshop on Dust in the Atmosphere of Mars and Its Impact on Human Exploration. 2017. 6032
- 81 Montabone L, Forget F. On forecasting dust storms on Mars. In: 48th International Conference on Environmental Systems. 2018. ICES-2018-281
- 82 Wei Y, He F, Fan K, et al. Preliminary predictions of the dust storm activity at the landing site of China's Zhurong Mars rover in 2022 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2022, 67: 1938–1944 [魏勇, 何飞, 范开, 等. 祝融号火星车巡视区2022年沙尘暴活动趋势初步分析. 科学通报, 2022, 67: 1938–1944]
- 83 Lewis S R, Read P L. An operational data assimilation scheme for the Martian atmosphere. *Adv Space Res*, 1995, 16: 9–13
- 84 Hoffman M J, Greybush S J, John Wilson R, et al. An ensemble Kalman filter data assimilation system for the Martian atmosphere: Implementation and simulation experiments. *Icarus*, 2010, 209: 470–481
- 85 Mulholland D P, Read P L, Lewis S R. Simulating the interannual variability of major dust storms on Mars using variable lifting thresholds. *Icarus*, 2013, 223: 344–358
- 86 Spiga A, Faure J, Madeleine J B, et al. Rocket dust storms and detached dust layers in the Martian atmosphere. *J Geophys Res Planets*, 2013, 118: 746–767
- 87 Navarro T, Forget F, Millour E, et al. The challenge of atmospheric data assimilation on Mars. *Earth Space Sci*, 2017, 4: 690–722
- 88 Wang Z S, Zhou W Y, Tian B Y, et al. Preliminary orbit design for a Mars sample return mission (in Chinese). *Sci China Phys Mech Astron*, 2019, 49: 156–171 [汪中生, 周文艳, 田百义, 等. 火星采样返回任务轨道方案初步设计. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2019, 49: 156–171]
- 89 Favata F, Hasinger G, Tacconi L J, et al. Introducing the Voyage 2050 White Papers, contributions from the science community to ESA's long-term plan for the Scientific Programme. *Exp Astron*, 2021, 51: 551–558
- 90 Oberst J, Wickhusen K, Gwinner K, et al. Planetary polar explorer—The case for a next-generation remote sensing mission to low Mars orbit. *Exp Astron*, 2022, <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09820-x>
- 91 Sánchez-Cano B, Lester M, Andrews D J, et al. Mars' plasma system. Scientific potential of coordinated multipoint missions: “The next generation”. *Exp Astron*, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10686-021-09790-0>
- 92 Reale O. Building a standardized Observing System Simulation Experiment (OSSE) framework for Mars. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.0483bad0>
- 93 Aileen Y R. Mars system science why Mars remains a compelling target for Solar system science. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.a781358c>
- 94 Guzewich S. Measuring Mars atmospheric winds from orbit. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.6576a506>
- 95 Guzewich S. The Mars atmospheric and polar science mission. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.7e4e0e4d>
- 96 Montabone L. Observing Mars from areostationary orbit: Benefits and applications. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.0cdca220>
- 97 Jakosky B, Amato M, Atreya S, et al. Scientific value of returning an atmospheric sample from Mars. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.9799651c>
- 98 Smith I B. Solar-system-wide significance of Mars polar science. *Bull Am Astron Soc*, 2021, 53, <https://doi.org/10.3847/25c2cfcb.4db95c67>
- 99 Montabone L, Forget F, Michael S, et al. Mars Aerosol Tracker (MAT): An areostationary SmallSat to monitor dust storms and water ice clouds. In: Interplanetary CubeSat Workshop, 2018. A.2.4

- 100 Montabone L, Cantor B, Capderou M, et al. Monitoring Mars' atmospheric dynamics: From an areostationary SmallSat concept to a "MultiSat" concept. In: Interplanetary CubeSat Workshop. 2019. A.2.5
- 101 Silva J J, Romero P. Optimal longitudes determination for the station keeping of areostationary satellites. *Planet Space Sci*, 2013, 87: 14–18
- 102 Kleinböhl A, Schofield J T, Kass D M, et al. Mars climate sounder limb profile retrieval of atmospheric temperature, pressure, and dust and water ice opacity. *J Geophys Res Planets*, 2009, 114: E10006
- 103 Wang T H, Sun M X, Huang J P. Research review on dust and pollution using spaceborne lidar in China (in Chinese). *Trans Atmos Sci*, 2020, 43: 144–158 [王天河, 孙梦仙, 黄建平. 中国利用星载激光雷达开展沙尘和污染研究的综述. *大气科学学报*, 2020, 43: 144–158]
- 104 Yang N, Xia C, Yu T, et al. Measurement of Martian atmospheric winds by the O₂ 1.27 μ m airglow observations using Doppler Michelson Interferometry: A concept study. *Sci China Earth Sci*, 2021, 64: 2027–2042
- 105 Fan K, Wei Y. Prospection of multi-spacecraft planetary exploration missions in upcoming future (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 4350–4353 [范开, 魏勇. 行星探测进入多卫星任务时代. *科学通报*, 2021, 66: 4350–4353]
- 106 Wei Y, Yao Z, Wan W. China's roadmap for planetary exploration. *Nat Astron*, 2018, 2: 346–348
- 107 Wan W X, Wei Y, Guo Z T, et al. Toward a power of planetary science from a gain of deep space exploration (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 748–755 [万卫星, 魏勇, 郭正堂, 等. 从深空探测大国迈向行星科学强国. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 748–755]
- 108 Wu F Y, Wei Y, Song Y H, et al. From fusion of research and teaching to leading of science—Strategy to build planetary science program with Chinese characteristics (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 741–747 [吴福元, 魏勇, 宋玉环, 等. 从科教融合到科学引领——中国特色的行星科学建设思路. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 741–747]
- 109 Wei Y, Zhu R X. Planetary science: Frontier of science and national strategy (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 756–759 [魏勇, 朱日祥. 行星科学: 科学前沿与国家战略. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 756–759]
- 110 Rong Z J, Cui J, He F, et al. Status and prospect for Chinese planetary physics (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 760–768 [戎昭金, 崔峻, 何飞, 等. 我国行星物理学的发展现状与展望. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 760–768]
- 111 Hui H J, Qin L P. Planetary chemistry in China (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 769–775 [惠鹤九, 秦礼萍. 我国行星化学学科发展现状与展望. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 769–775]
- 112 Li X Y, Lin W, Xiao Z Y, et al. Planetary geology: "Extraterrestrial" model of geology (in Chinese). *Bull Chin Acad Sci*, 2019, 34: 776–784 [李雄耀, 林巍, 肖智勇, 等. 行星地质学: 地质学的“地外”模式. *中国科学院院刊*, 2019, 34: 776–784]
- 113 Rong Z, Cui J, Wei Y. Inaugural Chinese planetary science conference. *Nat Astron*, 2021, 5: 991–992
- 114 Geng Y, Zhou J S, Li S, et al. Review of first Mars exploration mission in China (in Chinese). *J Space Explor*, 2018, 5: 399–405 [耿言, 周继时, 李莎, 等. 我国首次火星探测任务. *深空探测学报*, 2018, 5: 399–405]
- 115 Wan W X, Wang C, Li C L, et al. China's first mission to Mars. *Nat Astron*, 2020, 4: 721
- 116 He F, Yao Z H, Wei Y. Development and prospect of planetary optical remote sensing at Lenghu (in Chinese). *Earth Planet Phys*, 2021, 52: 361–372 [何飞, 尧中华, 魏勇. 冷湖行星光学遥感发展与展望. *地球与行星物理评论*, 2021, 52: 361–372]
- 117 Greeley R, White B R, Pollack J B, et al. Dust storms on Mars: Considerations and simulations. In: Péwé T L, ed. *Desert Dust: Origin, Characteristics, and Effect on Man*. Boulder: Geological Society of America, 1981. 101–122
- 118 Wu Z, Ling Z, Zhang J, et al. Mars environment chamber coupled with multiple *in situ* spectral sensors for Mars exploration. *Sensors*, 2021, 21: 2519

Summary for “我国未来在轨监测火星沙尘暴的设想和方案”

The orbit schemes to monitor Martian dust storms: Benefits to China's future Mars missions

Zhaojin Rong^{1,2,3*}, Yong Wei^{1,2*}, Fei He^{1,2}, Jiawei Gao^{1,2}, Kai Fan^{1,2}, Yuqi Wang^{1,2}, Lucy Klinger⁴, Limei Yan^{1,2}, Zhipeng Ren^{1,2}, Xu Zhou^{1,2}, Ning Tan⁵ & Tao Yu⁶¹ Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;² College of Earth and Planetary Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;³ Mohe Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Mohe 165303, China;⁴ Beijing International Center for Mathematical Research, Peking University, Beijing 100080, China;⁵ Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;⁶ Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China* Corresponding authors, E-mail: rongzhaojin@mail.iggcas.ac.cn; weiy@mail.iggcas.ac.cn

Mars is most often the focus of planetary explorations because it promises to have signs of extraterrestrial life. China's first Mars mission, called Tianwen-1, was launched on 22 May 2021 and was successful in “orbiting, landing and roving” the planet and exploring its environment. Following this success, China planned to carry out another Mars mission, known as Tianwen-3, to collect and return samples. However, dust storms posed a significant threat. Such activity on Mars has an evident pattern of seasonal variation, frequently occurring during spring and summer in the southern hemisphere. Under certain conditions, this dust activity can develop into a global storm, lasting several months, and can strongly perturb the upper atmosphere, which is crucial for the aerocapture of probes. Even regional storms can modify local visibility, temperature, wind, and the density of the lower and middle atmosphere, which impact parachutes, navigational imaging, and other decent-entry-landing and take-off probe processes. Indeed, the tiniest grains of dust pose a threat to human soft tissues and are harmful to the surface probes' mechanisms and filters. Solar panels, cameras, etc., are also adversely impacted by dust deposition, which peaks during the fallout of a global dust storm. Thus, forecasting dust storms is invaluable for reducing or avoiding damage to these probes. However, the physical complexity of dust storms on Mars is not fully understood, making accurate forecasts of dust storms, and particularly their onset, challenging. To aid future Mars missions such as the Tianwen-3, we propose that China establish a network to monitor Martian dust storms and atmospheric weather that is based on observations of Mars from a spacecraft constellation. This constellation consists of three spacecraft in an equatorial synchronous orbit with an altitude of about 17000 km and one spacecraft in a large-elliptic polar orbit whose perigee altitude is about 150 km. The constellation with “four-point integration” can form a monitoring and alert network that provides simultaneous, continuous, and global-scale observations of the Martian atmosphere and surface. As an innovative platform for space-based science, this network has many advantages for Mars exploration, because it can monitor Martian dust storms and geomorphic changes on the surface, as well as the space environment and atmospheric weather. It is also beneficial for spacecraft relaying communication from probes on the Martian surface, allowing continuous data to be uplinked. Finally, the constellation is an ideal platform for on-orbit computing, delivering computer resources to surface assets, and global navigation of Mars.

Martian dust storms, Mars aerostationary orbit, multipoint measurements, spacecraft constellation, Mars sample return

doi: [10.1360/TB-2022-0756](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0756)