



论文

面向火星取样返回任务的火星沙尘暴 监测与预报方法研究

刘继忠^{1,2,3}, 程旋^{2,3*}, 席翔宇^{2,3}, 康焱^{1,2,3}, 戎昭金⁴, 李艺苑⁵, 李勃⁶, 黄宁⁷,
赵纯^{2,8}, 曲少杰⁹, 邵艳利^{2,3}, 何飞⁴, 刘娟娟⁵, 朱明明⁵, 刘明宇⁵, 吴兆朋⁴,
裴斌斌⁷, 陈琦^{2,3}

1. 国家航天局探月与航天工程中心, 北京 100190
2. 深空探测实验室(天都实验室), 合肥 230071
3. 深空探测全国重点实验室, 合肥 230000
4. 中国科学院地质与地球物理研究所行星科学与前沿技术重点实验室, 北京 100029
5. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029
6. 山东大学空间科学研究院, 威海 264209
7. 兰州大学西部灾害与环境力学教育部重点实验室, 兰州 730000
8. 中国科学技术大学, 合肥 230026
9. 北京空间飞行器总体设计部, 北京 100094

*E-mail: chengxuan15@mails.ucas.ac.cn

天问三号任务关键技术攻关项目(编号: TW3006、TW3011)资助

摘要 火星存在时空尺度复杂的沙尘暴活动, 可能引起着陆器或巡视器等活动机构卡滞、能源供给下降等问题, 显著增加任务实施风险, 有必要开展火星沙尘暴的监测与预报研究, 降低任务风险. 本文面向火星取样返回任务, 结合着陆区选址进展, 分析了 10 个候选着陆区火星沙尘暴的特征. 结果表明, 在非沙尘季节开展火面工作仍存在被沙尘暴活动侵袭的可能性. 为降低和规避沙尘暴对任务的影响, 本文基于现有载荷资源, 制定了面向火星取样返回任务的着陆点原位监测和轨道遥感监测策略, 形成沙尘暴多维感知能力. 以多维感知的火星图像、沙尘光学厚度等数据为基础, 结合图像序列法、机器学习法、数值预报法、数值与人工智能融合预报等方法, 初步形成多手段火星沙尘暴综合预报能力, 可辅助支撑任务决策. 为更好保障和服务我国火星取样返回任务, 后续进一步围绕火星沙尘暴监测与预报保障关键问题开展研究, 包括沙尘暴发生发展机制研究与沙尘参数化方案优化、数据反演方法创新、集合预报技术探索、智能预报方法研究等, 支撑构建“监测-预报-决策”一体化保障体系, 提升面向火星取样返回任务的火星天气业务化保障能力, 降低任务风险, 确保火星样品返回地球.

关键词 火星沙尘暴, 监测方法, 预报方法, 火星取样返回任务

引用格式: 刘继忠, 程旋, 席翔宇, 等. 面向火星取样返回任务的火星沙尘暴监测与预报方法研究. 中国科学: 技术科学, Liu J Z, Cheng X, Xi X Y, et al. Research on monitoring and forecasting methods of Martian dust storms for China's Mars Sample Return mission (in Chinese). Sci Sin Tech, 2025,

1 引言

在太阳系中, 火星的气候环境与地球最为接近. 火星有四季交替的气候环境, 表面具有河道、峡谷、沟壑、冲积平原等地貌特征. 研究表明, 至少在 30 多亿年前火星可能具有宜居性^[1]. 因此, 火星是太阳系探测和行星科学研究的热点, 至今, 共 7 个国家/组织实施了 47 次探测任务, 成功着陆火星的任务共 11 个, 仅中国和美国实现了火星环绕、着陆和巡视探测. 在科学上, 通过近 60 年的探测, 火星探测的科学目标从早期寻找水到探测宜居环境向直接探测火星生命痕迹不断演变, 不断深化了人类对火星水活动、宜居性、气候和地质演化的认识和理解. 2024 年 7 月, 科学家利用毅力号(Perseverance)火星车搭载的科学仪器分析了杰泽罗陨石坑古老河床中的一块红褐色岩石, 发现其主要由水合磷酸铁和硫化铁构成, 但无法确认其是否为生物成因^[2]. 因此, 实现火星样品返回地球才有望揭示火星是否存在生命或曾经存在生命, 回答宇宙生命起源和演化等重大基础科学问题. 我国火星取样返回任务(天问三号)计划于 2028 年前后实施, 开展表取、钻取和飞行采样, 实现火星样品返回地球, 支撑获得重大科学发现.

火星沙尘活动频发, 尤其在火星南半球春、夏季节, 涵盖尘卷风(公里尺度)、局地沙尘暴(百公里尺度)和区域沙尘暴(千公里尺度)等. 在一定条件下, 区域沙尘暴可发展为持续时间长达数月的全球沙尘暴. 火星多时空尺度沙尘活动会诱发复杂的物理效应^[3, 4], 是影响甚至终止火星探测任务的危险因素之一, 对火星探测任务带来很大的风险. 沙尘暴期间, 火星沙尘在风场作用下产生摩擦起电, 产生放电现象, 影响电子设备的正常工作^[5-7]. 对于火面采样机构等活动部件, 沙尘活动可能引起活动部件卡滞或阻力增大, 引发机械故障, 影响采样工作^[4, 8]. 对于样品容器等具有高密封性要求的设备, 沙尘颗粒的进入可能影响样品容器密封漏率, 导致其不满足行星保护要求, 样品原始性无法保证. 沙尘暴期间沙尘暴会增加光学厚度, 减弱火星大气的能见度, 影响光学相机、太阳能帆板等设备的正常运行. 如, 1971 年水手 9 号(Mariner 9)轨道器抵达火星后即遭遇全球沙尘暴, 导致全球影像获取计划被迫推迟数周^[9]. 火星全球勘探者号(Mars Global Surveyor, MGS)在 1997-1998 年大气制动初期, 因沙尘暴导致上层大气密度超出预期,

多次被迫调整轨道^[10]. 好奇号(Curiosity)与机遇号(Opportunity)火星车在 2007 年(MY28)全球性沙尘暴期间, 光学厚度从 0.5 激增至超过 4.0, 导致能源供给急剧下降, 被迫进入节能模式^[11]. 2018 年, 机遇号火星车遭遇持续数月的全球沙尘暴, 局地光学厚度超过 8, 导致能源中断, 最终失联, 成为首个明确因沙尘暴而终止的火星表面任务^[12, 13]. 洞察号(InSight)着陆器在其任务后期(2019-2022)经历多次区域性沙尘暴, 导致太阳能帆板积尘加剧, 能源供给持续下降, 最终因沙尘覆盖导致电力耗尽而任务终止^[14, 15]. 我国祝融号火星车为应对沙尘活动导致的太阳帆板发电能力降低及冬季低温环境, 于 2022 年 5 月 18 日转入休眠模式. 基于以往任务经验, 火星沙尘暴对任务的影响不容忽视. 为应对和规避火星沙尘暴对任务的影响, 沙尘暴的监测和预报是十分必要的.

在火星沙尘暴监测方面, 从水手 9 号开始, 美国、欧洲的火星探测器大多都搭载了可探测沙尘暴活动的仪器, 包括光谱仪、辐射计、成像仪/相机等. 目前, 监测火星沙尘暴的方法或手段大致可分为两类, 即天底观测模式的红外光谱仪/辐射计、多谱段相机/成像仪, 以及天顶观测模式的相机/辐射计^[16]. 天底观测模式下, 红外光谱仪/辐射计通过计算大气中散射的沙尘辐射特性, 定量反演红外波段的沙尘光学厚度. 比较有代表性的是 MGS/TES (Thermal Emission Spectrometer)、Odyssey/THEMIS (Thermal Emission Imaging System) 和 MRO/MCS (Mars Climate Sounder). Montabone 等综合这些载荷在 9.3 μm 波段的探测数据, 定量反演得到了沙尘光学厚度数据(CDOD), 在科学和工程方面应用广泛^[17, 18]. 多谱段相机/成像仪是监测沙尘暴分布和演化的强有力工具, 能直观呈现火星全球的沙尘活动情况. MGS 搭载的多谱段相机(MOC)和 MRO 搭载的火星彩色成像仪(MARCI)持续提供火星全球沙尘活动图像. 其中 MARCI 至今仍在工作, 每日可形成一幅全球覆盖的火星影像. 这种监测方式只能定性评估沙尘暴的发生地域和范围, 优点在于直观反映当下的火星沙尘状态. 天顶观测模式下, 相机/辐射计直接拍摄太阳, 定量反演固定地点上空的沙尘光学厚度. 海盗 1/2 号着陆器(Viking 1&2)、探路者号(Pathfinder)均搭载了相关载荷对太阳直接成像, 定量反演可见光波段沙尘光学厚度. 机遇号、好奇号等在桅杆上搭载了

类似的载荷,在每个火星日正午前后,利用相同的可见光波段对太阳直接成像,反演得到可见光波段沙尘光学厚度,实现沙尘暴监测.特别是机遇号,持续开展了5个火星年的沙尘暴监测.这种方式提供了定点的沙尘观测,但覆盖范围小,无法捕捉沙尘暴的全局特征,对预判沙尘暴的移动方向和影响范围具有局限性.

在火星沙尘暴预报方面,参考地球天气预报方法,经验预报、机器学习和数值预报是实现沙尘暴预报分析的有效途径.在经验预报方面,各国火星探测任务实施前都要开展着陆区的沙尘暴时空分析.Cantor等使用7个火星年的MRO/MARCI影像研究了Mars 2020任务的最终三个预选着陆区的沙尘暴时空概率,评估沙尘暴对Mars 2020任务进入-下降-着陆(Entry, Descent and Landing, EDL)过程的潜在危害^[19].Montabone等根据CDOD的历史数据评估分析了ESA ExoMars着陆器(Schiaparelli)着陆时的沙尘变化分布,从统计角度分析了沙尘光学厚度在特定时间段内的变化幅度,为着陆任务提供环境支撑^[20].魏勇等利用CDOD历史数据评估了祝融号火星车在2022年期间经历沙尘暴的变化趋势,提出2022年3~12月可能发生强沙尘暴,对祝融号的工作开展可能造成影响^[21].Qu等基于卫星影像数据识别了乌托邦区域的原生尘暴,提取尘暴序列并计算尘暴序列的生命周期,移动方向以及响应时间,综合天问一号中分辨率相机(MoRIC)影像开展了天问一号着陆当天的尘暴预报^[22].近年来,机器学习技术在气象预报领域展现出巨大的潜力^[23].通过分析大量历史气象数据,机器学习模型能够捕捉沙尘暴发生的复杂模式和特征,从而提高预报的准确性.LSTM/TCN等时间序列网络在沙尘强度预报方面具有较好的效果^[24].CNN/ConvLSTM等方法能从卫星图像数据中学习沙尘暴的移动规律,进而进行预报^[25].但机器学习方法的劣势在于物理可解释性差,对高质量输入数据依赖大.在数值模拟和预报方面,目前,国内外仅有少数模式能模拟接近观测的火星全球尘暴发生频率,例如:美国GFDL Mars GCM^[26]和MarsWRF^[27],英国的UKMGCM^[28],中国GoMars^[29].此外,美国的Mars 2020任务使用多个数值模式为毅力号着陆区的气象环境提供数值模拟,以支撑任务运行和科学探测规划^[30, 31].美国火星探索计划(2024-2044)也将火

星天气预报作为未来发展的重点方向,以支撑未来火星探测任务(<https://science.nasa.gov/resource/the-mars-future-plan/>).然而,国际上尚无应用于火星探测任务的业务化数值预报系统.主要原因在于火星沙尘抬升并注入大气的机制比较复杂,目前数值模型中缺乏准确的沙尘抬升参数化方案,并且缺乏连续的高时空覆盖性的实时或准实时火星气象观测数据,短期内发展出火星沙尘暴业务化数值预报系统是极具挑战的^[32, 33].

天问三号任务从着陆器进入-下降-着陆到上升器起飞上升,期间在火星工作2~3个月,需完成多模式采样、密封、封装、转移及科学探测等工作,关键环节多,过程复杂,实施难度大.综合以上分析,火星沙尘暴可能影响任务成败.为规避和降低火星沙尘暴对取样返回任务的影响,需开展多方位、多手段火星沙尘暴监测和预报方法研究,形成着陆区的沙尘活动水平提前评估的能力,为天问三号任务提供辅助决策信息,保障火星探测任务的顺利实施.

2 火星沙尘暴特征分析

基于Montabone等构建的MY24~MY36火星全球红外沙尘光学厚度数据集^[17, 18],对火星沙尘暴的气候特征进行分析,如图1所示.火星沙尘活动存在显著的季节变化特征:在火星北半球春夏季节($L_s \approx 0^\circ \sim 135^\circ$),火星全球沙尘活动普遍较弱.在火星北半球秋冬季节($L_s \approx 135^\circ \sim 360^\circ$),火星全球沙尘活动普遍较强.针对我国天问三号任务,为尽可能减少火星沙尘暴的影响,选择在非沙尘季节期间着陆于克律塞平原($17^\circ \text{N} \sim 30^\circ \text{N}$, $10^\circ \text{W} \sim 60^\circ \text{W}$)或乌托邦平原($17^\circ \text{N} \sim 30^\circ \text{N}$, $76^\circ \text{E} \sim 136^\circ \text{E}$)候选着陆区,并开展火面采样与科学探测工作.

然而,非沙尘季节也可能发生区域沙尘暴,影响任务实施.在MY35的非沙尘季节期间($L_s \approx 35^\circ \sim 45^\circ$), 30°N 附近发生了一次小规模的区域沙尘暴活动.图2给出了该沙尘暴事件在 $L_s = 38.252^\circ$ 时的全球分布.可以看到该事件主要发生在克律塞平原附近,涵盖火星冲积平原与古河道,是火星生命痕迹探寻的关键区域.因此,即使在非沙尘季节开展火面工作仍存在一定的风险,除在任务实施过程中开展沙尘暴监测与预报外,在任务实施前期评估候选着陆区沙尘活动水平也是十分重要的.

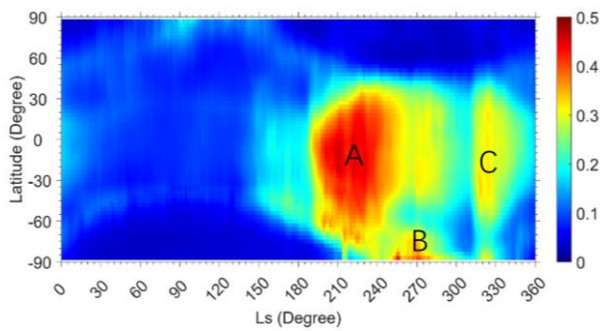


图 1 在 610 Pa 等压面高度处, 火星沙尘红外光学厚度在 MY24-MY36 期间随火星纬度和太阳经度的平均变化分布. 数据来源于文献^[17, 18].

Figure 1 The distribution of column dust optical depth (CDOD) varied with solar longitude (L_s) during MY24–MY36 at 610 Pa. Data are sourced from References 17 and 18.

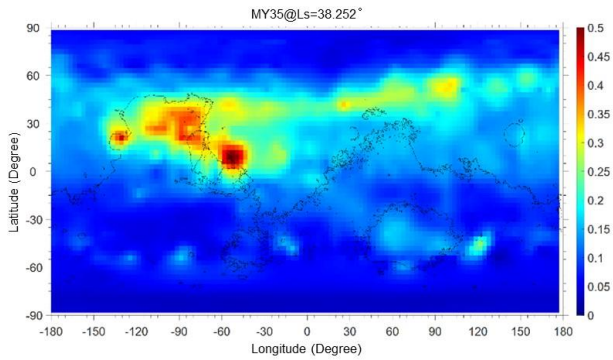


图 2 在 610 Pa 等压面高度处, 时间为 MY35 且 $L_s=38.252^\circ$ 时的火星全球沙尘光学厚度分布. 数据来源于文献^[17, 18].

Figure 2. The global distribution of CDOD at 610 Pa in MY35 when $L_s=38.252^\circ$. Data are sourced from References 17 and 18.

天问三号任务以探寻火星生命痕迹为第一科学目标, 为确保科学目标的可实现性, 着陆点将选择在生命痕迹高概率区域. 基于科学需求和工程约束, 在克律塞平原和乌托邦平原两个预选着陆区初步遴选了 10 个候选着陆区, 具体见表 1 和图 3.

利用 MY24~MY36 期间的 CDOD 数据, 分析了 10 个候选着陆区的光学厚度随 L_s 的分布, 如图 3 所示. 天问三号任务火面工作时间约为 $L_s=0^\circ\sim60^\circ$, 在此期间, CDOD 最大包络约为 0.3, 换算为可见光波段沙尘光学厚度(VDOD)为 1.08, 根据比尔-朗伯定律, 可见光波段太阳辐射将下降约 66%, 影响着陆器能源供给. 参考 NASA 沙尘暴等级划分^[34], 沙尘暴等级

为 3 级, 要求只能在白天开展合理限度的探测活动, 对着陆器应采取防护措施. 尽管非沙尘期间各着陆区域内的平均光学厚度都非常低, 统计上来讲沙尘暴活动较弱, 但依然存在被沙尘暴活动侵袭的可能性.

表 1 天问三号任务候选着陆区位置^[35]
Table 1 Candidate landing sites of Tianwen-3 mission^[35].

序号	着陆区(点)	经度	纬度
1.	麦克劳林撞击坑 (McLaughlin crater)	22.3–22.5°W	21.89–21.9°N
2.	欧克西亚高原 (Oxia Planum)	24.4–24.41°W	18.26–18.5°N
3.	马沃斯谷 (Mawrth Vallis)	19.62–21.3°W	23.4–25.27°N
4.	欧亚马撞击坑 (Ouyama crater)	19.8–21.1°W	23.4–24.0°N
5.	尼利槽沟 (Nili Fossae)	73.3–79.4°E	18.1–29.4°N
6.	卡塞峡谷 (Kasei Valles)	53.0–61.4°W	25.6–27.9°N
7.	天问一号着陆区附近	109.7–112.3°E	20.4–25.2°N
8.	西穆德谷 (Simud Valles)	37.2–39.0°W	10–21°N
9.	伊希斯平原 (Isidis Planitia)	89.5°E	21.7°N
10.	贝克勒尔撞击坑 (Bequerel Crater)	8.3°W	22.1°N

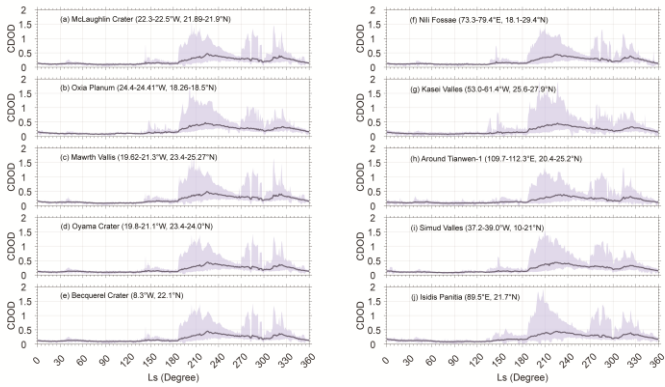


图 3 天问三号任务候选着陆区在 MY24~MY36 期间的平均沙尘光学厚度分布. 阴影部分的上包络为最大沙尘光学厚度, 下包络为最小沙尘光学厚度.

Figure 3. Distribution of average dust optical depth in the candidate landing sites for Tianwen-3 mission during MY24–MY36. The upper envelope of the shaded area is the maximum dust optical depth, and the lower envelope is the minimum dust optical depth.

3 火星沙尘暴监测方法

3.1 着陆点原位监测

根据最新的火星观测结果,火表风速最高可达 44m/s ^[36],风速是沙尘暴的核心驱动性参数,是决定沙尘暴“能否发生、如何发展、影响范围多大”的核心变量.火表风速与起沙过程关系密切,当风应力超过阈值时发生起沙^[37].此外,由于火星大气密度远小于地球大气,起沙过程对火表风速更为敏感^[38].针对火星气象环境,着陆器配置火星气象测量仪,对着陆点的气压、风速、风向进行监测.继承祝融号火星车配置的气象测量仪,风速测量范围为 $0\sim 70\text{m/s}$,分辨率优于 0.5m/s .气压测量范围为 $1\sim 1500\text{Pa}$,分辨率优于 0.1Pa ,支持沙尘暴期间风速与气压的动态测量,为后续预报结果的检验和订正提供原位数据.

参考《地面气象观测规范 气象能见度》(GB/T 35224-2017),利用探测器配置的支撑火面采样任务的采样过程监视相机、样品转移微型相机等工程参数测量相机替代人眼观测,是实现火星着陆点沙尘暴监测的有效手段.考虑探测器在火夜资源有限,主要采用白天目测方法定性分析气象能见度.首先解决观测主体替代问题,保证工程参数测量相机与人眼对目标物的对比度的一致性.将探测器的光学传感器预先校准为“模拟人眼”,设定中心波长 550nm ,对比阈值 0.05 .其次确定火面目标物,选择工程参数测量相机视场内颜色较深且具有稳定特征的多个目标物,如山体、大型岩石等,要求所选目标物在天空背景下轮廓清晰,视角不小于 0.5° ;且已知与着陆器的大致距离.目标物与着陆器的距离可通过轨道遥感或采样飞行器着陆区高精度地图重构获得.

根据可见的最远目标物和不可见的最近目标物估算火星气象能见度.若目标物恰好能见,则着陆器与目标物的距离即为该方向上的气象能见度.若目标物轮廓清晰,但无更远的目标物,气象能见度判断参照表 2.

表 2 火面有目标物但无更远目标物时气象能见度参考表
Table 2 Reference table for meteorological visibility when there are targets on the Martian surface but no farther targets.

目标物细节部分的清晰程度	气象能见度/km	沙尘等级
清楚	$\geq 5 \times$ 目标物距离	基本无沙尘

隐约可辨	$(2.5\sim 5) \times$ 目标物距离	轻度沙尘
完全看不清	$\leq 2.5 \times$ 目标物距离	重度沙尘

注:清楚定义为目标物颜色、细节部分清晰可辨;隐约可辨定义为目标物颜色、细节部分虽可识别,但需集中注意力仔细观察才能分辨.完全看不清定义为目标物颜色、细节部分均无法辨认.

若着陆点附近地形较为平坦,在着陆器工程参数测量相机视场内可能没有合适的参照物用于能见度的观测,参照地球海面气象能见度估计方法,将火星天地分界线视为地球水天分界线,通过天地分界线的清晰程度估算能见度.火星气象能见度估算参考表 3.

表 3 火面无目标物时气象能见度参考表
Table 3 Reference table for meteorological visibility when there is no target on the Martian surface.

天地分界线清晰程度	气象能见度/km	沙尘等级
十分清楚	≥ 50	无沙尘
清楚	$20\sim 50$	基本无沙尘
勉强可以看清	$10\sim 20$	轻微沙尘
隐约可辨	$4\sim 10$	中度沙尘
完全看不清	< 4	重度沙尘

注:十分清楚定义为天地分界线锐利、无模糊,边界极致清晰;清楚定义为天地分界线清晰,仅边缘略有柔和过渡,边界仍可明确识别,无明显模糊;勉强可以看清定义为天地分界线模糊,边缘有明显融合过渡区域,需集中注意力仔细观察才可勉强区分边界;隐约可辨定义为天地分界线严重模糊,仅能隐约察觉边界大致走向,无法明确区分天地的清晰界限;完全看不清定义为天地分界线完全消失,天地颜色融为一体,无法分辨边界.

3.2 轨道遥感监测

我国天问一号环绕器搭载的中分辨率相机至今仍在轨工作,MoRIC 的工作波段为可见光,采用标准 RGB 彩色相机,视场角为 $53.3^\circ \times 41.2^\circ$;在 400km 轨道高度时,拍摄图像的星下点空间分辨率为 98m ^[39].在轨工作期间,曾多次拍摄到了火星局地沙尘暴(如图 4),具备沙尘暴的监测能力.在天问三号任务期间,利用 MoRIC 可获取着陆区及周邊遥感影像,为沙尘暴的图像识别提供数据支撑.

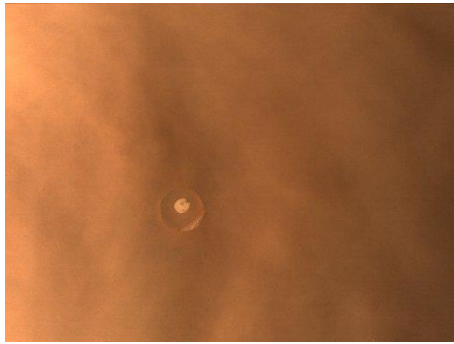


图 4 天问一号中分辨率相机拍摄的火星沙尘暴图像。
Figure 4 Dust storm observed by the MoRIC on the Tianwen-1 orbiter.

针对沙尘暴轨道遥感监测, 面向天问三号任务需求, 为获取火星沙尘暴全球成像数据, 支撑火星沙尘暴预报, 在轨道器上新增一台火星全球多色相机, 用于提供关键的火星沙尘活动状态监测和预报信息, 主要技术参数如表 4 所示. 火星全球多色相机的视场角为 130° (跨轨) $\times 15^\circ$ (沿轨), 通过卫星飞行进行推扫成像, 获得星下点分辨率优于 2 km 的火星沙尘暴图像, 可支持沙尘暴图像的识别. 火星全球多色相机工作在紫外-近红外波段, 共设置了 7 个谱段, 谱段中心波长分别为 260 nm 、 320 nm 、 440 nm 、 550 nm 、 600 nm 、 770 nm 、 860 nm . 在可见光通道, 440 nm 、 550 nm 和 600 nm 这三个谱段图像融合为沙尘暴彩色图像, 用于识别沙尘暴的位置、范围, 通过序列图像计算沙尘暴的移动速度与方向, 支撑沙尘暴到达时间和影响范围分析. 为提升尘暴识别的准确性, 通过紫外通道 260 nm 和 320 nm 两个谱段监测火星全球臭氧含量的时空变化, 根据臭氧损耗与沙尘暴活动之间的显著反相关关系, 实现沙尘暴的识别, 与可见光通道的图像进行相互印证, 提高沙尘暴识别的准确度. 同时, 260 nm 、 320 nm 和 440 nm 三个谱段观测图像融合为彩色图像可以甄别水冰云的分布, 以剔除可见光图像中的水冰云对沙尘暴识别的干扰.

表 4 火星全球多色相机主要技术参数
Table 4 Main technical parameters of Mars Multicolor Camera

项目	技术参数
视场角	130° (跨轨) $\times 15^\circ$ (沿轨)
空间分辨率	优于 $2\text{ km}@350\text{ km}$
通道中心波长	260 nm 、 320 nm 、 440 nm 、 550 nm 、 600 nm 、 770 nm 、 860 nm

通道带宽	不大于通道中心波长的 10%
静态 MTF	≥ 0.2
功耗	$\leq 20\text{ W}$

相比 MoRIC, 火星全球多色相机采用紫外/可见光宽谱带双通道共焦面多光谱成像技术, 不仅具备火星中低纬沙尘暴活动彩色成像功能, 还具备火星表面和大气宽视场多光谱成像功能, 可用于沙尘光学厚度的定量反演, 为沙尘暴预报提供可靠的数据源. 通过卫星运动推扫成像观测, 火星全球多色相机可实现每个火星日着陆区连续 6 次重访及附近两千公里范围内连续监测, 对着陆区沙尘活动状态变化的监视十分重要. 考虑数据传输资源有限, 火星全球多色相机在任务不同时期采用不同的工作模式, 保证预报任务的同时, 减轻数据传输的压力. 在着陆前, 火星全球多色相机对火星表面 $\pm 52^\circ\text{N}$ 范围内进行监测, 每轨工作 50 min , 评估沙尘暴在着陆区发生的可能性及动态变化趋势. 在着陆过程、火面工作和起飞上升前期, 火星全球多色相机对着陆区进行重点观测, 每轨工作时长 15 min , 支撑 $2000\text{ km} \times 3000\text{ km}$ 范围沙尘暴的监测与预报.

4 火星沙尘暴预报方法

4.1 基于图像序列的沙尘暴预报方法

火星沙尘暴的源区、移动路径和出现时间等具有明显的时空重复性^[40]. 利用统计的历史沙尘暴发生的时空变化特征, 基于不同时间拍摄的着陆区及周边图像序列, 可实现沙尘暴的预报.

按照沙尘暴的起源位置和着陆区之间的关系, 将沙尘暴分为原生和非原生尘暴, 分别起源于着陆区本地和外部(一般指北极源区). 对原生尘暴预报, 需对着陆区开展连续观测, 以现有观测手段以及资源限制, 实现连续观测较为困难, 选址时应尽量注意规避原生尘暴区域. 若着陆区在历史指定时间内曾出现过原生尘暴事件, 该区域定义为危险区. 若未曾出现过尘暴事件, 则定义为安全区. 若未曾出现原生尘暴, 但有非原生尘暴事件经过, 则定义为预报区, 该区域有缓冲时间(即从沙尘暴产生后到达着陆区的时间)来分析和预报这些非原生尘暴.

杨茜等以天问一号任务着陆区沙尘暴预报为例, 基于 2021 年 5 月 13 日 MoRIC 影像数据, 对图像序

列法进行验证. 解译结果表明, 没有在火星北极和乌托邦平原发现沙尘暴事件, 如图 5 所示. 结果与历史沙尘暴事件统计结果一致, 检验了图像序列法用于沙尘暴预报的可行性.^[41]

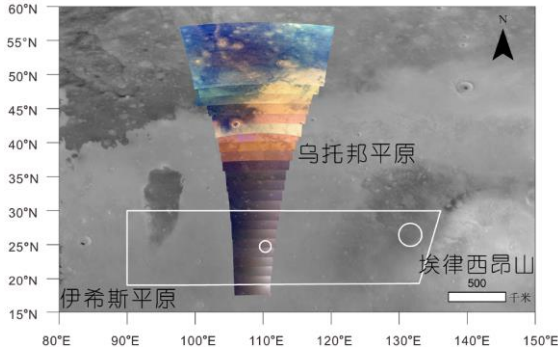


图 5 2021 年 5 月 13 日的 MoRIC 拼接影像. 白色多边形和圆表示乌托邦平原着陆区和着陆圆. 底图为 MOC WA Atlas oc 影像.^[41]

Figure 5 The MoRIC mosaic image on 13 May 2021. The white polygons and circles represent the landing area and landing circle of Utopia Planitia, respectively. The base map is the MOC WA Atlas oc Map.^[41]

面向天问三号任务, 通过关键技术攻关, 构建形成火星沙尘暴数据库^[42]. 以火星沙尘暴数据库为基础, 在 MY24~MY34 $Ls=0\sim60^\circ$ 克律塞平原和乌托邦平原预选着陆区中各识别出 19 和 16 个原生尘暴. 如图 6 所示, 安全区主要分布在克律塞平原和乌托邦平原预选着陆区的两侧. 这可能与两个因素相关: 区域地形与局地沙尘暴发生频率呈负相关, 结构性沙尘暴更易出现在低海拔区域(<-4 km). 乌托邦和克律塞平原中部地形平坦、海拔较低, 位于尘暴序列的移动路径上.

另外, 克律塞平原和乌托邦平原预选着陆区中各识别出 119 个和 92 个生命周期为 2~7 个火星日的沙尘暴事件, 其中 17 个进入了候选着陆区. 乌托邦平原预选着陆区内识别出 92 个生命周期为 2~7 个火星日的沙尘暴事件. 大部分沙尘暴事件源自北极地区、乌托邦平原和阿拉伯台地北部. 基于此, 将乌托邦和克律塞预选着陆区中的预报区细分为三类, 对应的沙尘暴最短缓冲时间分别为 1 sol、2 sols 和 ≥ 3 sols, 如图 6 所示. 其中贝克勒尔撞击坑、尼利槽沟着陆区处于安全区. 而西穆德谷和卡塞峡谷着陆区大部分位于预报区, 仅部分区域分布于危险区, 若在这些区域实施着陆, 需避开其中的危险区. 尘暴序列抵

达麦克劳林撞击坑、欧克西亚高原和伊希斯平原着陆区至少需 3 个火星日, 抵达马沃斯谷与欧亚马撞击坑着陆区至少需 2 个火星日, 为沙尘暴预报预留了相对充足的缓冲时间.

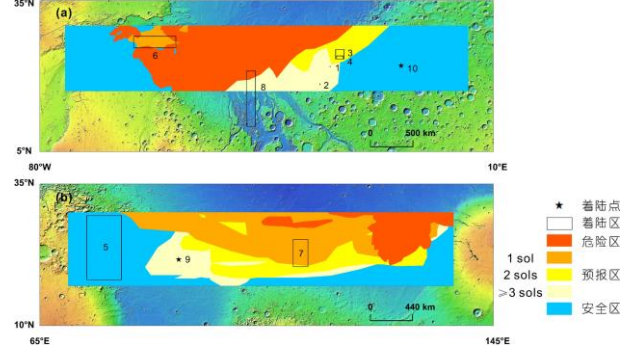


图 6 克律塞(a)和乌托邦(b)平原预选着陆区尘暴安全等级划分.

Figure 6 The danger zones, safety zones, and forecast zones in Chryse (a) and Utopia (b) study area.

在天问三号轨道器在轨工作期间, 火星全球多色相机将每日实现着陆区的多次重访, 并对着陆区及周边沙尘状态进行监测, 提前下传着陆区及周边图像, 经数据解译、处理和图像序列识别, 形成着陆区未来 1~3 天沙尘暴预报和预警信息. 后续将进一步结合着陆区遴选收敛情况, 明确着陆点的安全分区, 并进一步优化沙尘暴数据库, 构建沙尘暴智能识别模型, 提升沙尘暴识别精度和效率, 确保沙尘暴预报的准确性和时效性.

4.2 基于机器学习的沙尘暴预报方法

基于历史沙尘光学厚度数据, 国内多家研究团队已应用多种机器学习方法对火星沙尘暴的时空分布进行预报. He 等利用 ConvGRU-Seq2Seq 模型实现了约 12 小时的短周期沙尘暴时空预报, 平均绝对百分比误差(MAPE)低于 10%^[43]. Yan 等利用基于粒子群(PSO)优化的长短时记忆网络(LSTM)和卷积长短时记忆网络(ConvLSTM)对沙尘光学厚度进行时空预报, 实现了约 100 个火星日的沙尘暴强度预报, 对祝融号着陆区沙尘光学厚度预报结果的相对平均误差为 0.035^[44]. 这些研究表明, 机器学习方法在不同时间尺度上具备预报未来的沙尘暴强度的能力.

现有的沙尘暴预报方法通常可以获得沙尘暴强度随时间的预报值, 但无法给出预报区间以及准确

度等信息. 面向天问三号任务需求, 以下基于循环神经网络 RNN-LSTM 方法^[45], 构建了沙尘暴长短周期预报模型, 能够在时间序列建模中同时捕捉短时趋势与季节性特征. 与传统的确定性方法相比, 该方法不仅可以给出强度预报值, 还能提供预报区间, 从而量化沙尘暴演化过程中的不确定性, 对天问三号任务在关键窗口下任务实施风险评估具有重要作用.

以祝融号着陆区为例, 图 7 展示了基于 RNN-LSTM 方法的祝融号着陆区沙尘暴强度预报结果, 其中给出了预报结果中位数及 50%、95%、99% 等预报区间. 该模型以 MY24~MY34 共 11 个火星年的数据作为训练集, 对 MY35 全年的沙尘光学厚度进行了预报. 结果表明, 该模型能够较为清晰地再现 MY35 出现的季节性沙尘暴. 然而, 对于 MY35.2 出现的局地性小强度沙尘暴, 模型未能准确捕捉, 但该事件落入了 95% 的预报区间之内. 此外, 预报时间越长, 预报区间的范围越宽, 这表明预报误差会随时间推移而显著增加.

表 5 给出了 RNN-LSTM 模型在祝融号着陆区和全球范围内 MY35 沙尘暴强度的误差计算结果. 误差采用均方根误差(RMS)进行评估, 在 100 个火星日内, 沙尘光学厚度的预报精度优于 0.1. 值得注意的是, 预报精度并非随着预报时长缩短而单调提高. 这是因为模型未能准确再现 MY35.2 出现的季节性沙尘暴, 但对当年其他时段的预报效果较好.

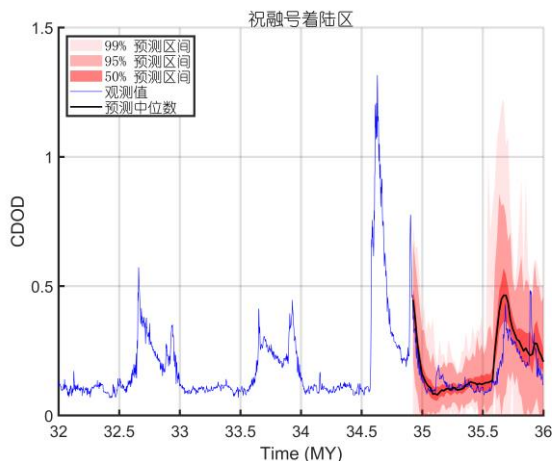


图 7 基于 RNN-LSTM 方法的 MY35 沙尘光学厚度预报结果. 图中, 黑线表示模型输出的预报均值, 蓝线表示观测数据, 红色阴影区域表示预报区间.

Figure 7 The deep learning model forecasts the dust optical depth for Martian Year 35. In the figure, the black line denotes the predicted

mean, the blue line represents the observations, and the red shaded area indicates the prediction interval.

表 5 基于 RNN-LSTM 方法的 MY35 沙尘光学厚度预报误差

地点	时间范围	RMS 值
祝融号 着陆区	15 Sol	0.072
	50 Sol	0.052
	100 Sol	0.041
	15 Sol	0.081
全球平均值	50 Sol	0.061
	100 Sol	0.049

综上所述, RNN-LSTM 模型不仅能够给出沙尘暴强度的预报值, 还提供了不同置信水平下的预报区间, 可为未来火星取样返回任务提供有价值的参考. 尽管如此, 利用机器学习模型进行沙尘暴强度预报仍存在一定局限, 特别是在预报局地性事件以及全球沙尘暴强度方面仍需改进. 后续随着数据的不断积累和机器学习模型的改进完善, 逐步提升着陆区沙尘暴预报效率和预报精度. 结合火星全球多色相机定量反演的沙尘光学厚度, 形成高时效、高精度火星沙尘暴定量预报能力.

4.3 火星天气数值预报方法

4.3.1 数值预报方法

Bauer 等在《自然》杂志上发表的开创性文章《数值天气预报的寂静革命》指出, 数值天气预报的意义远不止于简单的“天气预报”, 更代表了一场彻底改变人类与自然环境互动方式的科学范式革命^[46].

数值预报系统由两大功能模块耦合而成: 模式与资料同化. 其中, 模式的核心任务是将观测事实中提炼的大气物理规律进行数学表达和数值求解. 以火星为例, 其模式的发展遵循与地球模式相似的演进路径: 自 1960 年代水手号首次飞掠火星获取大气温度剖面以来, 历次轨道器(如 MGS、MRO)、着陆器(如海盗系列)和巡视器(如好奇号、毅力号)持续提供的温度廓线、沙尘垂直分布、极地干冰季节性变化等观测数据, 被逐步转化为火星特有的辐射传输参数化、沙尘循环机制、CO₂ 凝华-升华过程等物理定律. 因此, 当前火星全球环流模式所实现的模拟能力, 本质上

是过去六十年观测知识系统积累与物理过程参数化持续改进的综合结果。

资料同化则为数值模式提供最优的初始条件。该方法基于贝叶斯理论的最优估计理论,将来源多样、时空分布不规则、且误差特征各异的观测资料(如卫星辐射率、原位温压湿风测量、雷达反射率等)与模式背景场进行融合,生成在物理上自洽、并与模式网格相匹配的高质量初始场。模式提供动力-物理约束,同化引入观测约束,二者共同决定了预报系统的起点精度与可预报性的时间上限。

为进一步提升天问三号任务沙尘暴预报保障能力,通过关键技术攻关,构建了我国自主的火星大气模式 GoMars^[47],开发了相匹配的火星大气资料同化方法,形成了面向天问三号任务的火星天气预报原型系统。基于该系统开展的大气-沙尘一体化三维数值预报试验结果表明,对于火星早春时段,同化轨道器观测的沙尘光学厚度数据,可以实现沙尘精准预报。MY25~MY37(去除 MY28 和 MY30 两个火星年春季观测数据质量低的年份,共 11 个火星年),每年预报时段 $L_s=10\sim20^\circ$ (约 20 个火星日),克律塞和乌托邦平原预选着陆区沙尘光学厚度的预报误差如图 8 所示。11 个火星年 20 个预报日全部预报实验的最大误差不超过 0.07,最小误差接近 0.01,误差平均值接近 0.03,初步具备了火星沙尘数值预报能力。后续结合火星全球多色相机反演的实时/准实时沙尘光学厚度,可形成火星沙尘准业务化预报保障能力。

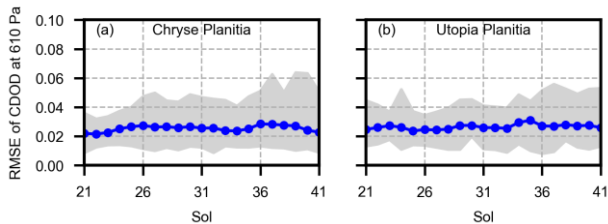


图 8 天问三号任务预选着陆区沙尘光学厚度预报误差的逐日变化。蓝线: 11 个火星年的平均值, 灰色区域: 最大、最小值的范围。(a)克律塞平原和(b)乌托邦平原。

Figure 8 Daily variation of CDOD prediction error in the candidate landing sites of the Tianwen-3. Blue line: Average value over 11 Martian years. Gray shaded area: Range of maximum and minimum values. (a) Chryse Planitia and (b) Utopia Planitia.

4.3.2 数值与人工智能的融合预报方法

在地球气象大模型的发展中,庞大的数值预报

再分析数据为训练提供了坚实基础,例如华为盘古^[48]、Google 的 NeuralGCM^[49]模型均依赖此类数据学习大气演变规律。然而,火星面临显著的数据稀缺性问题,这使得完全依赖人工智能方法构建火星气象大模型存在严峻挑战,包括泛化能力弱、对沙尘暴预报能力有限以及物理一致性难保障等。将传统数值预报与人工智能相结合的方法不仅能缓解纯数据驱动方案对数据量的依赖,还能结合数值模型的物理约束与人工智能强大的学习能力,显著提升预报的准确性和稳健性。因此,考虑将传统的数值预报与人工智能方法相结合,发展一种面向天问三号任务的混合预报框架。具体而言,首先以物理机制驱动的火星天气预报原型系统生成初步预报场,提供动力-热力背景;再利用人工智能技术(如卷积神经网络、图神经网络或条件生成模型等)对预报结果进行误差订正和降尺度处理。人工智能模型能够从有限的火星观测数据(如轨道器遥感数据、着陆器原位观测数据等)中学习系统偏差及其非线性演变规律,从而有效修正火星全球环流模式在沙尘活动等关键环节预报中存在的误差。

为验证方法的可行性,基于 GoMars 模式生成的 MY24~MY36 沙尘光学厚度模拟数据,采用 Swin Transformer Unet (Swin-UNet)模型结合观测数据,对模拟结果进行订正。其中 MY24~MY33 沙尘光学厚度模拟数据作为训练集,MY34~MY35 作为验证集,MY36 年作为独立测试集,订正结果如图 9 和图 10 所示。对非沙尘季节,在火星早春时段(第 1~30 个火星日),Swin-Unet 模型减小了 GoMars 模式在南北纬 30° 之间的正偏差,均方根误差从 0.052 下降至 0.022 (如图 9 $L_s=0\sim15^\circ$)。在天问三号任务预选着陆区所在纬度带($17^\circ\text{N}\sim30^\circ\text{N}$),相比 GoMars 模拟结果,经 Swin-Unet 模型优化后的沙尘光学厚度空间分布与观测具有更好的一致性,空间相关系数从 0.8 提升到 0.9 (图 10)。对于沙尘季节,Swi-Unet 模型提高了沙尘光学厚度时空演变特征的准确度,特别是图 9 中 $L_s=320^\circ$ 之后强沙尘活动的衰减时间以及南极地区沙尘活动的强度均与观测更接近。

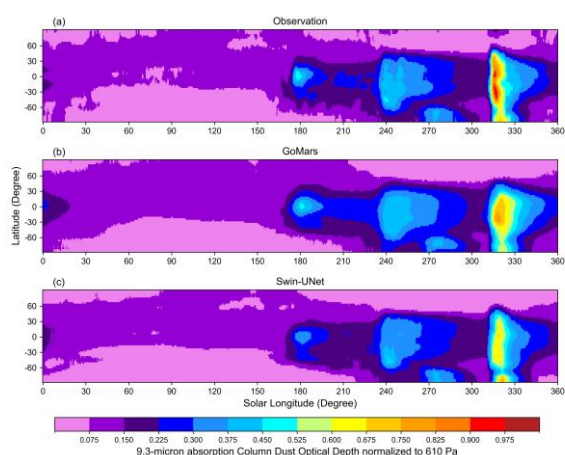


图 9 火星全球年平均的沙尘光学厚度纬度时间分布图。上: 轨道器观测, 中: GoMars 模式模拟, 下: Swin-Unet 优化。

Figure 9 Latitude- L_s distribution of Martian global annual average CDOD. Top: Observation. Middle: GoMars simulation. Bottom: Swin-Unet optimization.

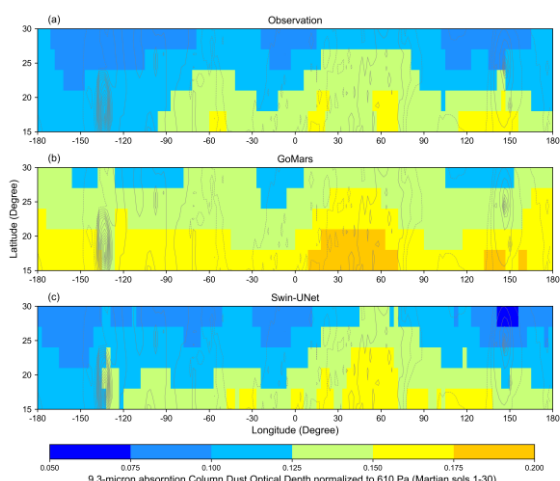


图 10 第 1~30 个火星日平均的沙尘光学厚度空间分布图。纬度范围覆盖天问三号任务预选着陆区所在纬度带。填色: 沙尘光学厚度, 灰线: 地形。上: 轨道器观测, 中: GoMars 模式模拟, 下: Swin-Unet 优化。

Figure 10 Spatial distribution of average CDOD from sol 1 to 30. The latitude range covers where the candidate landing sites of the Tianwen-3. Coloring: Dust optical depth. Gray lines: Topography. Top: Observation. Middle: GoMars simulation. Bottom: Swin-Unet optimization.

5 未来工作展望

面向天问三号任务需求, 针对火星沙尘暴先期

开展了相关研究工作, 也取得的丰硕的成果, 初步形成了多手段火星沙尘暴综合预报能力。后续将进一步围绕火星沙尘暴的监测与预报保障关键问题开展研究, 提升面向天问三号任务的火星天气业务化保障能力, 支撑火星样品返回地球。

(1) 研究沙尘暴发生发展机理, 夯实参数化理论根基。

研究发现, 火星表面的风应力系统性地超出了从地球风沙运动理论外推得到的全球环流模型预测值, 且频繁突破启动颗粒跃移和沙尘扬起所需的临界值^[36, 50]。因而火星沙尘运动机理, 特别是起沙机制还需进一步深入研究, 如局部热力不稳定、地形效应、冰尘相互作用或与 CO_2 循环的耦合作用等。沙尘暴从局部尺度到区域尺度发展为全球尺度的升级机制尚不清楚, 研究表明, 发展为全球性沙尘暴的局地或区域沙尘暴并无显著空间分布特征, 且全球沙尘暴发生时间不倾向于某个特定的太阳经度范围^[3], 实现全球性沙尘暴的准确预报仍是一大挑战。深入研究火星沙尘暴发生、发展和演化物理机制, 为火星大气模式的沙尘参数化方案优化改进提供理论支撑, 以支持火星大气模式的改进, 提升预报能力。

(2) 创新多源数据反演, 拓充模型输入维度。

准确的初始场是驱动火星天气数值预报的基础条件之一。地球数值天气预报通过同化数以千计的气象台站观测数据和大量卫星遥感数据, 从而为数值预报提供准确的初始场, 实现高精度天气预报。然而, 目前对火星沙尘暴的监测手段十分有限, 短期内难以实现大量火星轨道气象监测卫星或星座部署。因此, 亟需基于现有光谱数据、图像资料等科学和工程数据, 发展新的反演算法, 丰富火星沙尘暴关键数据, 为沙尘暴预报提供新数据源。如基于火表沙波纹形态、沙丘形态与内部结构、尘卷风或升华流留下的火表印记等具有指示作用的变量反算风场等大气参量, 以丰富和改进初始场数据。

(3) 发展集合预报技术, 量化预报不确定性。

集合预报技术已在地球天气预报广泛应用, 在提升台风移动路径预测、极端天气预警等应用方面已有显著成效。火星尘卷风和局部沙尘暴具有突发性, 可借鉴地球大气集合预报思想, 发展适用于火星天气预报的集合预报技术。通过多模式集成和初始扰动引入(蒙特卡洛模拟、粒子滤波等算法), 量化沙尘参数(如起沙效率、沉降速度)的误差传播规律, 生成

火星沙尘暴概率预报产品. 结合历史沙尘暴数据库, 优化预报模型的初始扰动方案, 实现对着陆区尘卷风、区域性沙尘暴及全球性沙尘暴发生的概率、强度、分布和移动路径的概率预报, 提升预报可靠性与预警提前量.

(4) 构建智能预报体系, 实现预报数智赋能.

考虑火星沙尘暴的极端动态特性及当前火星探测数据的稀疏性, 数值预报与人工智能的融合将成为火星沙尘暴预报的核心发展方向. 利用火星历史沙尘暴事件的遥感影像数据、沙尘光学厚度数据和大气数据等多源数据训练模型, 捕捉传统数值模式难以解析的非线性动力学特征(如区域沙尘暴向全球沙尘暴的升级机制), 并与数值模式深度融合, 构建“数据驱动-物理约束”混合的短临(0-24 小时)、短期(1-3 天)、中长期多尺度智能预报体系, 实现“突发性沙尘暴”移动路径、强度、影响范围、影响时间等关键参数的快速响应和季节、年际等长期气候尺度趋势分析, 满足从任务论证到任务实施全生命周期不同时间尺度预报保障需求.

(5) 贯通监测预报链条, 保障探测任务安全

保障火星取样返回任务, 打通监测预报链条是关键, 需构建“监测-预报-决策”一体化保障体系, 将碎片化观测数据、预报模型与任务决策深度融合, 形成应对火星沙尘暴的闭环保障能力. 核心是监测数据精准驱动预报、预报结果准确锚定任务决策. 基于现有观测能力和数据下行链路资源, 根据观测数据对预报的贡献程度, 制定分级传输策略, 确保关键数据实时/准实时接入. 建立智能数据处理中枢, 实现多源异构数据的自动清洗与高效融合, 形成高精度高可靠初始场, 为预报提供高质量输入. 集成智能预报体系, 面向不同决策需求, 形成递进式火星气象预报服务能力. 建立“沙尘暴等级-任务决策”的动态关联规则库, 将预报结果转化为影响评估报告和应对措施建议. 将决策的实际结果反馈智能数据中枢, 用于预报模型优化和决策动态关联规则库的更新, 最终形成“监测数据-模型预报-任务决策-结果反馈”的自进化闭环.

致谢 火星沙尘光学厚度数据集来自 https://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/dust_climatology/index.html.

参考文献

- 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
- Hurowitz J A, Tice M, Allwood A, et al. Redox-driven mineral and organic associations in Jezero Crater, Mars. *Nature*, 2025, 645: 332-340
- Rong Z J, Wei Y, He F, et al. The orbit schemes to monitor Martian dust storms: Benefits to China's future Mars mission (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 716-728 [戎昭金, 魏勇, 何飞, 等. 我国未来在轨监测火星沙尘暴的设想和方案. *科学通报*, 2023, 68: 716-728]
- 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 [王誉棋, 魏勇, 范开, 等. 沙尘暴对火星表面探测器影响: 回顾与展望. *科学通报*, 2023, 68: 368-379]
- Merrison J, Jensen J, Kinch K, et al. The electrical properties of Mars analogue dust. *Planet Space Sci*, 2004, 52: 279-290
- Krauss C E, Horányi M, Robertson S. Experimental evidence for electrostatic discharging of dust near the surface of Mars. *New J Phys*, 2003, 5: 70
- 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
- McMillon-Brown L, Peshek T J, Pal A, et al. A study of photovoltaic degradation modes due to dust interaction on Mars. *Sol Energy Mater Sol Cells*, 2021, 221: 110880
- Leovy C B, Briggs G A, Young A T, et al. The martian atmosphere: Mariner 9 television experiment progress report. *Icarus*, 1972, 17: 373-393
- Albee A L, Arvidson R E, Palluconi F, et al. Overview of the Mars Global Surveyor mission. *J Geophys Res Planets*, 2001, 106: 23291-23316
- Lemmon M T, Wolff M J, Bell J F, et al. Dust aerosol, clouds, and the atmospheric optical depth record over 5 Mars years of the Mars Exploration Rover mission. *Icarus*, 2015, 251: 96-111
- 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
- Callas J L, Golombek M P, Fraeman A A. Mars Exploration Rover Opportunity End of Mission Report. 2019.
- Banfield D, Spiga A, Newman C, et al. The atmosphere of Mars as observed by InSight. *Nat Geosci*, 2020, 13: 190-198

- 15 Spiga A, Banfield D, Teanby N A, et al. Atmospheric Science with InSight. *Space Sci Rev*, 2018, 214: 109
- 16 He F, Wei Y, Rong Z J, et al. Monitoring methods for Martian dust storms (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2046–2057 [何飞, 魏勇, 戎昭金, 等. 火星沙尘暴监测方法. *科学通报*, 2023, 68: 2046–2057]
- 17 Montabone L, Forget F, Millour E, et al. Eight-year climatology of dust optical depth on Mars. *Icarus*, 2015, 251: 65–95
- 18 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. *J Geophys Res Planets*, 2020, 125: e2019JE006111
- 19 Cantor B A, Pickett N B, Malin M C, et al. Martian dust storm activity near the Mars 2020 candidate landing sites: MRO-MARCI observations from Mars years 28–34. *Icarus*, 2019, 321: 161–170
- 20 Montabone L, Forget F. On forecasting dust storms on Mars. In: 48th International Conference on Environmental Systems. Boston: IEEE, 2018. ICES-2018-281
- 21 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]
- 22 Qu S, Li B, Zhang J, et al. Evaluation and Analysis of Dust Storm Activity in Tianwen-1 Landing Area Based on the Moderate Resolution Imaging Camera Observations and Mars Daily Global Maps. *Remote Sens*, 2022, 14: 8
- 23 Alshammari R K, Alrwais O, Aksoy M S. Machine Learning Applications to Dust Storms: A Meta-Analysis. *Aerosol Air Qual Res*, 2022, 22: 220183
- 24 Yarmohamadi M, Alesheikh A A, Sharif M. Using Hybrid Deep Learning Models to Predict Dust Storm Pathways with Enhanced Accuracy. *Climate*, 2025, 13: 16
- 25 Alshehhi R, Gebhardt C. Detection of Martian dust storms using mask regional convolutional neural networks. *Prog Earth Planet Sci*, 2022, 9: 4
- 26 Basu S, Wilson J, Richardson M, et al. Simulation of spontaneous and variable global dust storms with the GFDL Mars GCM. *J Geophys Res Planets*, 2006, 111: E12003
- 27 Newman C E, Richardson M I. The impact of surface dust source exhaustion on the martian dust cycle, dust storms and interannual variability, as simulated by the MarsWRF General Circulation Model. *Icarus*, 2015, 257: 47–87
- 28 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
- 29 Liu S, Dong L, Xi X, et al. The Fully Interactive Martian Dust Cycle Simulations by the GoMars Model. *Adv Atmos Sci*, 2026, 43: 461–476
- 30 Pla-García J, Rafkin S C R, Martinez G M, et al. Meteorological Predictions for Mars 2020 Perseverance Rover Landing Site at Jezero Crater. *Space Sci Rev*, 2020, 216: 148
- 31 Newman C E, de la Torre Juárez M, Pla-García J, et al. Multi-model Meteorological and Aeolian Predictions for Mars 2020 and the Jezero Crater Region. *Space Sci Rev*, 2021, 217: 20
- 32 Navarro T, Forget F, Millour E, et al. The Challenge of Atmospheric Data Assimilation on Mars. *Earth Space Sci*, 2017, 4: 690–722
- 33 Zhou X, Wei Y, Wu Z P, et al. Martian whole atmosphere model and dust activities: Review and prospect (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 1058–1067 [周旭, 魏勇, 吴兆朋, 等. 火星全大气模式与沙尘活动模拟研究: 回顾与展望. *科学通报*, 2024, 69: 1058–1067]
- 34 Staab M S, Herman J A, Reich K, et al. MER Opportunity Dust-Storm Recovery Operations and Implications for Future Mars Surface Missions. In: 2020 IEEE Aerospace Conference. Big Sky: IEEE, 2020. 1–20
- 35 Hou Z, Liu J, Pang F, et al. In search of signs of life on Mars with China's sample return mission Tianwen-3. *Nat Astron*, 2025, 9: 783–792
- 36 Bickel V T, Almeida M, Read M, et al. Dust devil migration patterns reveal strong near-surface winds across Mars. *Sci Adv*, 2025, 11: eadw5170
- 37 Newman C E, Lewis S R, Read P L, et al. Modeling the Martian dust cycle, 1. Representations of dust transport processes. *J Geophys Res Planets*, 2002, 107: 6-1-6-18
- 38 Kok J F, Parteli E J R, Michaels T I, et al. The physics of wind-blown sand and dust. *Rep Prog Phys*, 2012, 75: 106901
- 39 Yu G, Liu E, Liu G, et al. Moderate Resolution Imaging Camera (MoRIC) of China's First Mars Mission Tianwen-1. *Earth Planet Phys*, 2020, 4: 364–370
- 40 Cantor B, Malin M, Edgett K S. Multiyear Mars Orbiter Camera (MOC) observations of repeated Martian weather phenomena during the northern summer season. *J Geophys Res Planets*, 2002, 107: 3-1-3-8
- 41 Yang X, Li B, Tian Y, et al. Spatio-temporal probability analysis and predicting of Martian dust storms based on remote sensing imagery——A case study of Tianwen-1 mission (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2025, 70: 107–120 [杨茜, 李勃, 田园, 等. 基于遥感影像的火星沙尘暴时空概率分析与预报——以“天问一号”任务为例. *科学通报*, 2025, 70: 107–120]
- 42 Wen P, Tian Y, Li B, et al. Establishment of Safety Evaluation Factors for Dust Storms in the Landing Area Selection for Tianwen-3 Mission. *Earth Space Sci*, 2025, 12: e2024EA003994
- 43 He Z, Zhang J, Sheng Z, et al. Deep learning-based 12-hour global dust distribution forecasting on Martian. *Rev Geophys Planet Phys*, 2024, 55: 479–492
- 44 Yan X, Li Z, Yu T, et al. Temporal and Spatial Prediction of Column Dust Optical Depth Trend on Mars Based on Deep Learning. *Remote*

- Sens, 2025, 17: 1472
- 45 Salinas D, Flunkert V, Gasthaus J, et al. DeepAR: Probabilistic forecasting with autoregressive recurrent networks. *Int J Forecast*, 2020, 36: 1181-1191
- 46 Bauer P, Thorpe A, Brunet G. The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 2015, 525: 47-55
- 47 Dong L, Pu Y, Li Y Y, et al. A new global open planetary atmospheric model for Mars: GoPlanet-Mars V1 (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2024, 69: 1343-1350 [董理, 普业, 李艺苑, 等. 新一代火星大气模式 GoPlanet-Mars V1 的研制. *科学通报*, 2024, 69: 1343-1350]
- 48 Bi K, Xie L, Zhang H, et al. Accurate medium-range global weather forecasting with 3D neural networks. *Nature*, 2023, 619: 533-538
- 49 Kochkov D, Yuval J, Langmore I, et al. Neural general circulation models for weather and climate. *Nature*, 2024, 632: 1060-1066
- 50 Swann C, Sherman D J, Ewing R C. Experimentally Derived Thresholds for Windblown Sand on Mars. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL084484

Research on monitoring and forecasting methods of Martian dust storms for China's Mars Sample Return mission

LIU JiZhong^{1,2,3}, CHENG Xuan^{2,3*}, XI XiangYu^{2,3}, KANG Yan^{1,2,3}, RONG ZhaoJin⁴, LI YiYuan⁵, LI Bo⁶, HUANG Ning⁷, ZHAO Chun^{2,8}, QU ShaoJie⁹, SHAO YanLi^{2,3}, HE Fei⁴, LIU JuanJuan⁵, ZHU MingMing⁵, LIU MingYu⁵, WU ZhaoPeng⁴, PEI BinBin⁷, & CHEN Qi^{2,3}

¹ Lunar Exploration and Space Engineering Center, Beijing 100190, China

² Deep Space Exploration Laboratory, Hefei 230071, Anhui, China

³ National Key Laboratory of Deep Space Exploration, Hefei 230000, Anhui, China

⁴ Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁵ Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

⁶ Institute of Space Sciences, Shandong University, Weihai 264209, China

⁷ MOE Key Laboratory of Mechanics on Disaster and Environment in Western China, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

⁸ University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

⁹ Beijing Institute of Spacecraft System Engineering, Beijing 100094, China

Mars exhibits complex dust storm activities across diverse spatiotemporal scales, which may cause issues such as jamming of movable mechanisms and degradation of energy supply. These problems significantly increase the risks of mission implementation, making it imperative to conduct research on the monitoring and forecasting of Martian dust storms to mitigate mission risks. Focusing on China's Mars Sample Return mission and integrating the progress of landing site selection, this study analyzes the characteristics of Martian dust storms at 10 candidate landing sites. The results indicate that there remains a possibility of dust storm intrusion during surface operations conducted in non-dust seasons. To reduce and avoid the impacts of dust storms on the mission, this paper develops in-situ monitoring strategies for landing sites and orbital remote sensing monitoring strategies based on existing payload resources, establishing a multi-dimensional perception capability for dust storms. Using multi-dimensionally perceived data—including Martian images and dust optical depth—as the foundation, and combining methods such as the image sequence method, machine learning, numerical forecasting, and numerical forecasting-artificial intelligence hybrid approaches, a preliminary comprehensive dust storm forecasting capability with multiple methods is established, which can provide auxiliary support for mission decision-making. To better support and serve China's Mars Sample Return mission, further research will be conducted focusing on the key issues related to the monitoring and forecasting of Martian dust storms subsequently, including research on initiation and evolution mechanisms of Martian dust storms, optimization of dust parameterization schemes, innovation of data retrieval methods, exploration of ensemble forecasting techniques, and research on intelligent forecasting methods, etc. Such efforts will assist to construct an integrated "monitoring-forecasting-decision-making" support system, enhance the operational Martian weather support capability for China's Mars Sample Return mission, mitigate mission risks and ensure the successful return of Martian samples to Earth.

Martian dust storms, monitoring methods, forecasting methods, China's Mars Sample Return mission