



火星全大气模式与沙尘活动模拟研究: 回顾与展望

周旭¹, 魏勇^{1,2*}, 吴兆朋¹, 任志鹏^{1,2}, 谭宁³, 范斯腾⁴, 何飞^{1,2}, 戎昭金^{1,2}, 闫丽梅^{1,2}, 王誉棋^{1,2}, 范开¹, 高佳维¹

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, 中国科学院新生代地质与环境重点实验室, 北京 100029;

4. 南方科技大学地球与空间科学系, 深圳 518055

* 联系人, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

2023-11-14 收稿, 2024-01-10 修回, 2024-01-12 接受, 2024-01-23 网络版发表

国家自然科学基金(42222408, 42204165, 42241135, 42304186)、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)、中国科学院青年创新促进会(Y2021027)和中国博士后科学基金(2023M743466)资助

摘要 基于火星全大气模式的数值模拟研究有助于深入理解火星陆面-大气-空间环境多圈层相互耦合过程, 是当今国际研究热点. 模式对整个火星大气区域气象要素的描述亦可作为保障火星探测活动顺利开展的重要参考依据. 沙尘活动显著影响着火星气候与天气变化, 也对火星表面探测器可造成巨大安全威胁. 对沙尘活动及其影响完善的模拟是目前全大气模式开发与研究工作中的重点之一. 本文回顾了火星全大气模式的发展历程, 概述了其构建方法, 总结了相关科研成果, 多角度论述了自主发展火星全大气模式的重要科研与工程价值, 建议以火星沙尘活动为重点研究方向, 牵引我国火星全大气模式的自主研发. 模式的开发与应用涉及行星科学、空间科学、大气科学、计算机科学多领域协同合作. 其开发过程势必带动我国行星科学全面发展, 为相关研究领域积累经验、储备人才.

关键词 火星全大气模式, 数值模拟, 火星沙尘暴, 火星多圈层耦合

基于理论模式的数值模拟研究是探究火星大气与空间环境变化性及其物理规律的重要工具. 构建火星全球环流模式(global circulation model, GCM)对深入理解相关物理机制和服务未来火星探测计划具有重要战略意义. Leovy和Mintz^[1]于1969年首次模拟了火星低层大气环流. 之后的30余年中, 国际上的火星GCM开发团队将模拟区域不断向上延拓, 于21世纪初构建了首个完整描述火星低层、中层和高层大气与电离层区域内中性成分及等离子体状态的全大气耦合模式MGCM-MTGCM(Mars GCM coupled with Mars Ther-

mosphere General Circulation Model)^[2]. 近20年中, 几个国际常用的火星全大气模式不断完善, 目前已初步具备完整模拟火星陆面-大气-空间环境多圈层耦合过程的能力, 如美国的M-GITM模式(Mars Global Ionosphere-Thermosphere Model)^[3]以及欧洲的Mars PCM模式(Mars Planetary Climate Model)^[4,5]. 全大气模式的发展动力主要源于: 中高层大气物理化学过程是描述火星大气与空间环境变化关联中的必要环节; 高层大气变化在行星气候演化与宜居性研究中的重要科研价值; 探测任务中对火星整个大气区域气象条件认知的工程

引用格式: 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

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, doi: [10.1360/TB-2023-1171](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1171)

需求等。

沙尘活动是火星耦合陆面-大气-空间系统过程中极具特色且影响显著的现象之一,是目前所有火星GCM必须考虑的物理过程^[6,7]。以空间尺度划分,火星沙尘暴可依照扬尘面积分为局地沙尘暴($<10^6 \text{ km}^2$)、区域沙尘暴($>10^6 \text{ km}^2$)和吞噬整个火星的全球性沙尘暴。显著的季节性变化表现为:太阳经度(solar longitude, L_S) $0^\circ \sim 180^\circ$ 通常为非沙尘季节,大气沙尘含量较低;而 L_S $180^\circ \sim 360^\circ$ 大气沙尘逐步增多含量,并可能在此期间发展为全球性沙尘暴。事实表明,沙尘暴的发生对火星表面探测器安全运行有灾害性影响。例如,美国的“勇气号”(Opportunity)、“机遇号”(Spirit)、“毅力号”(Perseverance)火星车均因沙尘的负面影响而失联;我国“祝融号”火星车在当前第36火星年的沙尘季节也转入“休眠”模式^[8]。大气中的悬浮沙尘能有效地影响大气辐射收支,在不同的环境条件下局部加热或冷却火星大气。沙尘和背景大气之间的相互作用对火星气候同样有着重要的影响^[9]。强烈的局地沙尘暴或全球性沙尘暴能够将沙尘抬升至火星大气中层顶高度、加强大气环流并影响火星空间环境^[10],如改变火星电离层热层状态以及加速大气中水汽与氢原子的逃逸等^[11-13]。因而,涵盖陆面-大气-空间系统的火星全大气模式是深入理解探究沙尘活动影响程度、理解火星气候演变过程、预测火星大气与空间环境的有力工具之一。

目前国际上常用的火星全大气模式包括由美国团队开发的MGCM-MTGCM耦合模式、M-GITM模式以及欧洲团队研发的MARS PCM模式。上述3个模式的成功发展均与彼时各国火星探测计划密切相关。目前我国正处于行星探测任务推动行星科学快速发展的重要时期:“天问一号”圆满实现“绕、着、巡”探测目标^[14],行星探测正进入多卫星时代^[15],未来各类火星探测计划正齐头并进、蓄势待发。在此背景下,我国发展火星全大气模式研究具有重要性与必要性。本文将回顾相关模式研发历程,论述其构建方法,总结相关科学研究进展,旨在多角度剖析其科研价值与工程意义,为未来我国开发独立自主的火星全大气模式、拓展行星空间环境研究夯实理论基础、展望研究方向。

1 火星全大气模式的发展历程

观测技术的进步使人类对火星大气的认知更加全面,并为开发更先进的火星大气模式奠定科学基础。而火星大气模式的发展一方面深化了对观测现象背后物

理规律的理解;另一方面回馈于观测任务之中,为其安全运行提供科学保障服务。图1给出了几次重要的探测任务与几个常用火星大气模式发展的时间线历程。20世纪60~70年代“水手号”(Mariner)的探测更新了以往基于望远镜的低空间分辨率探测对火星低层大气变化的认知。在水手号观测的基础上,1969年Leovy和Mintz^[1]通过修改UCLA(University of California, Los Angeles)大气环流模式首次模拟出火星低层大气三维环流及其季节变化。之后,“维京号”(Viking)着陆器在火星表面的成功探测则更进一步丰富了火星大气的观测资料。基于“维京号”丰富的大气观测数据,美国宇航局埃姆斯研究中心(NASA Ames)在20世纪80~90年代间逐步优化Leovy和Mintz的模式,并开发出新一代模式NASA Ames Mars GCM(Ames MGCM)^[16,17]。模式顶部边界由15 km拓展至47 km,相应的高度层数由3层增加到13层,并考虑更多样更复杂的大气物理过程。同一时期,美国大气海洋局地球物理流体动力学实验室(NOAA, GFDL)在地球GFEL SKYHI GCM模式的基础上开发了GFDL Mars GCM,并用于解释维京号观测到的大气波动现象^[18]。相较于当时Ames MGCM模式47 km的顶部边界,该模式两个版本的顶部边界可以分别达到68和88 km。法国巴黎大学气象动力实验室(Le Laboratoire de Météorologie Dynamique, LMD)基于已有的地球气候模式LMDZ引入新一代火星大气辐射传输模式^[19],开发出能够仅靠太阳辐射驱动而自洽模拟完整火星年变化的大气环流模式LMD MGCM,现称MARS PCM^[20]。同一时期,火星中高层大气与电离层模式也取得突破进展。Bougher等人^[21,22]基于地球热层电离层模式TIE-GCM开发出火星中高层大气-电离层耦合模式MTGCM。

20世纪末至21世纪初,新的一批火星观测计划带动了火星中高层大气与电离层研究,并推动了全大气模式时代的到来。1997年“火星探路者号”(Mars Pathfinder)成功着陆火星表面,其着陆过程在测试新的气囊弹跳着陆技术的同时也成功测量了大气温度剖面数据并获得了近地表大气参数。为保障探路者号的安全着陆,Haberle等人^[23]将MGCM模式的顶部边界拓展至80 km以提供着陆过程中可能遇到的气象条件。模拟结果与之后观测数据的对比在大气潮汐的表现上存在较大差异,再次促使MGCM在动力学解算上做出新的改进^[24,25]。同时期,Forget等人^[4]也指出向上拓展模式边界对于准确模拟火星大气温度与环流等基本过程的必

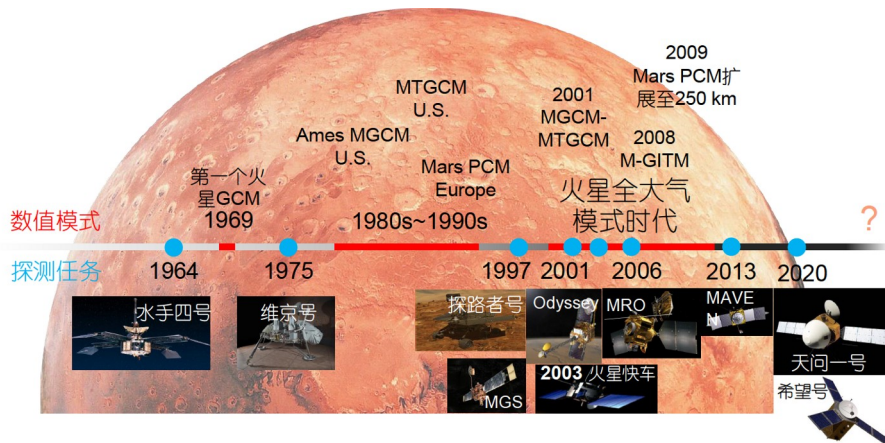


图1 几次重要的火星探测任务与全大气模式发展时间线示意图

Figure 1 Timeline of several Mars exploration missions and development of whole atmosphere model

要性,并开发出顶部边界为80 km的新一代MARS PCM.同时期抵达火星环绕轨道的火星全球勘探者号(Mars Global Surveyor, MGS)对整个火星大气层开展了全面而连续的观测,例如,首次拍下清晰的火星地形全貌,得到大气温度、沙尘不透明度等参量数年的连续观测,反演出数千个中性大气与电离层垂直剖面等.其丰富的观测数据进一步促进了火星大气模式数据同化研究领域的发展^[26],5600个电离层电子密度剖面的观测推进了火星大气-电离层耦合研究并影响至今^[27,28].在MGS任务筹备阶段,科研团队通过MTGCM底边界单向耦合MGCM的方式为其空气制动环节提供了重要的全大气区域模拟参考数据^[29,30].MGS之后的几次观测计划均体现出当时科学家对火星中高层大气与电离层的浓厚兴趣.2001年进入火星轨道的“奥德赛号”(Odyssey)能够获取火星大气逃逸层密度.2006年开始工作的“火星侦察轨道器”(Mars Reconnaissance Orbiter, MRO)搭载的火星气候探测仪(Mars Climate Sounder, MCS)能够探测0~80 km火星大气温度,从而加深了对火星大气动力学过程的理解.在计算机能力飞速提升的时代背景下,2000年Roble^[31]在美国地球物理年会上提出构建地面至逃逸层底部的全大气模式的宏伟构想及可行性分析.而对火星中性大气-电离层耦合过程认知的加深与学界对大气逃逸等领域持续关注也激励着科学家开发火星全大气模式的雄心.2001年Bougher等人^[2]为解释MGS中观测到的大气潮汐与电离层电子密度经度结构之间的关系,将MTGCM和MGCM两个模式更为完善地耦合,形成火星全大气模式的雏形.为更深入地理解火星环境,欧洲航天局(Eur-

opean Space Agency, ESA)于2003年6月发射的“火星快车号”(Mars Express)搭载了先进的探地与电离层探测雷达(Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionospheric Sounding, MARSIS),因而能够向下发射无线电波并接收回波信号反演得到顶部电离层的剖面信息^[32].为了对火星快车提供可用的在热层高度的空气制动数据并分析其观测结果,欧洲科研团队将MARS PCM进一步向上扩展至250 km,实现了首个具有统一模式架构的火星全大气模式^[5,33].此外,认识到MGCM-MTGCM模式在人为耦合边界中可能存在问题之后,Bougher等人^[34]于2008年便投身于建立新一代统一模型框架下的全大气模式(Mars Whole Atmosphere Climate Model, MWACM).其模型架构基于地球GITM模式,故也被称为M-GITM.建立该模式的目的之一便是为后续的火星大气与挥发物演化任务(Mars Atmosphere and Volatile Evolution, MAVEN)提供科学支持^[35].在21世纪的首个10年里,模式发展与观测任务的相辅相成开启了火星大气与空间环境研究的全大气模式时代.

2 火星全大气模式的构建方法

目前,已有的火星全大气模式的开发主体思路主要有两种:(1)直接耦合独立的低层大气和高层大气模式,如MGCM-MTGCM耦合模式;(2)在统一的模式框架下自洽描述整个大气空间,如MARS PCM和M-GITM(MWACM)模式.耦合2个独立的模式允许代码单独处理低层和高层大气中特有的不同时间尺度的物理过程,并能够独立优化运行代码.但其耦合交互面上热

力学和动力学过程(如太阳辐射加热、红外冷却、扩散、数值滤波等)无法做到精确匹配,难以“无缝”衔接.而建立全大气空间统一模型框架能够消除模型间的边界问题.但其难点在于整个模型范围中需要调整不同的时间步长来适应低层大气和高层大气不同时间尺度的物理过程.

不论是耦合模式还是统一框架下,全大气模式均在整个大气空间三维网格上数值求解流体动力学方程组与大气状态方程.主要的计算模块包括求解流体动力学方程的“动力核”(dynamical core)以及大气物理过程模式化描述的“物理包”(physics package).其中,热层与电离层扩展(>100 km)是火星GCM发展为全大气模式的关键步骤.

动力核通常是普适的,可以用在任何行星大气的动力学计算中.目前国际上有众多团队致力于开发与测试不同类型的动力核.解算过程主要基于有限差分法、有限体积法或谱方法.不同的动力核在求解基本大气运动、痕量物质传输等方面各有特色,因而也是决定最终模式性能的决定性因素之一.例如,近期美国Ames MGCM的开发团队指出,当前版本的主要缺点之一在于垂直混合过程较慢,需要更先进的动力核计算框架以改进其模拟性能^[36].如今Mars PCM可以提供不同版本的动力核以供不同的研究目的,例如英国研究团队开发的谱方法动力核、WRF模型动力核以及基于六边形网格的动力核等^[37].国际上已有多种各具特色的火星中低层大气模式,其动力学解算框架可供参考.由德国马普所(Max Planck Institute, MPI)主导开发的MAOAM MGCM始于2005年,修改自地球中层大气模式COMMA-IAP^[38].MAOAM MGCM早期模式流体力学动力核基于有限差分法,其后于2011年引入谱方法动力核求解^[39].目前该模式的上边界可达150 km,且在中层大气重力波参数化方面具有自身特色.而由美国大气研究中心主导开发的地球天气预报模式WRF也被Aeolis Research研究团队改进成为行星版本的Planet-WRF,其中Mars-WRF模式是其中用于模拟火星大气环境的部分^[40].其一大特色在于网格分辨率可调节且具备中尺度模拟能力^[41].其他国际知名的火星中低层大气模式有日本CCSR/NIES AGCM、Hokkaido模式,加拿大约克大学开发的GM3模式等.此外,地球大气模式常用的动力核也可作为火星大气模式开发的基础.例如,NOAA团队主导开发的FV3是目前较为先进的动力核^[42],并被用于下一代地球天气预测系统.其立方球体

网格在求解极点问题上具有优势,而基于有限体积法的解算方式保证了良好的守恒性.此外,融合两种不同的交错网格方法使其在求解线性和非线性过程中均有良好表现.然而,大气成分在均质层顶以上(约115~130 km)会因分子扩散增强而分离,因而其大气常数、比热系数、分子黏性系数等不再为常数.相比于中低层大气中湍流扩散过程的主导地位,热层中强烈的分子扩散过程使得垂直方向的动量与热量的传输更迅速.若要将动力核能够适用于火星中高层大气模拟则需要对其进一步修正.

热层电离层物理与化学过程是扩展火星全大气模式物理包中的核心模块.火星中高层大气中的主要成分除了CO₂,还有其离解产生的O和CO以及N₂.涉及主要光化学反应包括CO₂+hν→CO+O(³P), λ<205 nm和CO₂+hν→CO+O(¹D), λ<167 nm.热层大气的主要吸收谱线为软X射线(0.1~5 nm)和极紫外谱线(EUV, 5~110 nm).对该谱段的吸收使得火星大气从中层顶开始温度随高度快速增加,在逃逸层底部(约160~220 km)温度达到极大值.太阳辐射加热使火星热层存在显著的昼夜温差,从而形成全球尺度的大气风场环流,并造成大气成分的输运与重新分布.故火星GCM热层扩展中首要的任务是正确描述太阳辐射对热层的加热过程.一部分热层大气收到的加热能量以15 μm长波辐射的形式向太空传输,另一部分以分子热传导的形式向下输运.热层高度的15 μm辐射主要由以下过程产生:原子氧与其发生非弹性碰撞激发其振动态(v=2),之后能级向基态跃迁形成15 μm辐射.由于大气密度随高度指数下降,热层高度大气密度往往较低,分子间碰撞不够充分,导致热层大气偏离局地热平衡假设.因而,热层扩展中对大气CO₂非局地热平衡的修正极为重要.另外,由于火星没有强的内禀磁场,热层大气在没有磁层的保护直接暴露在太阳风之中.太阳辐射和太阳风的变化使得火星热层大气具有剧烈的时空变化性.例如,太阳11年周期、火星轨道的大偏心率、太阳27天自转以及短时太阳活动(如耀斑、CME等)均能使火星热层接收到的太阳辐射或太阳风在不同时间尺度上剧烈变化.太阳风对中性大气的影响主要体现在一定程度的加热与促使较热的大气成分逃逸.此外,太阳辐射除了能够加热火星热层大气,同时会离化中性大气产生等离子体,形成电离层.火星电离层主要的离子有O₂⁺、CO₂⁺、O⁺、CO⁺和NO⁺.日侧火星电离层基本满足Chapman理论,其等离子体总密度的垂直剖面呈现双峰结构;而夜

侧缺乏光照,其等离子体主要来源于日侧输运、高能电子沉降、微弱星光等过程。

因而,在火星电离层模式扩展中首要任务便是引入一系列中性-离子间的光化学反应过程,能够生成与观测相符的离子成分密度与垂直分布。另外直接作用在火星大气上的太阳风由于携带行星际磁场,也会对火星电离层产生众多影响,如离化、离子逃逸、离子出流、离子溅射等。源自低层大气的大气波动,如大气潮汐、重力波,也会向上传播到达火星热层和电离层,引起中性和等离子体的扰动。此外,通常的重力波参数化很难适用于火星中高层大气这种耗散作用较强的区域,还需要考虑分子扩散、热传导以及波动间的非线性相互作用等过程^[43]。因此,热层与电离层扩展必须包括EUV加热、CO₂辐射的非局地热平衡修正和光化学反应。其他重要的方面包括顶边界逃逸过程、离子动力学、剩余磁场、重力波参数化等。目前,中国科学院地质与地球物理研究所已成功在地球热层与电离层模式的基础上开发出我国首个火星热层与电离层耦合模式MITM(Mars Ionosphere-Thermosphere Model),并与Mars-WRF模式完成单向耦合。图2给出了该耦合模式在标准沙尘含量和高沙尘条件(3倍于标准含量)下的全球平均温度剖面。该模式初步模拟出由陆面至逃逸层区域(0~300 km)合理的火星大气层结,同时模拟结果展现出沙尘在不同高度产生的不同效应。这将成为火星全大气模式开发中向电离层和热层扩展的重要研究基础。

综上所述,无论是以耦合模式的方式还是以统一模型架构方式开发火星全大气模式,完整的模式都需要包括在整个大气区域内具有良好计算守恒性与稳定性的流体力学动力核与合理描述各种火星独特大气过程的物理包。模式基于各种复杂过程对大气参数的计算调整并和动力学过程相互耦合解算出整个大气区域的状态。图3概括了火星全大气模式的大致框架:(1) 太阳辐射与相关化学反应过程决定火星大气基本热力学结构;(2) 动力核解算流体动力学方程;(3) 参数化过程补充描述次网格尺度物理过程;(4) 边界层过程与沙尘暴活动耦合大气下垫面与火星表面;(5) 热层与电离层扩展将大气与空间环境连接。各个模块的发展对模拟结果的影响都至关重要。开发出一套独立的火星全大气模式需要不同领域专家学者协同配合、鼎力合作,而开发过程势必牵引我国行星科学的建设发展,为相关研究方向积累经验、储备人才。

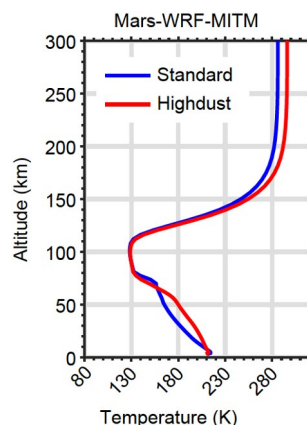


图2 Mars-WRF-MITM模拟的标准(蓝)和高沙尘(红)条件下的火星大气全球平均温度剖面

Figure 2 Profile of the global-mean atmosphere temperature simulated by the Mars-WRF-MITM coupled model under the standard (blue line) and high-dust condition (red line)

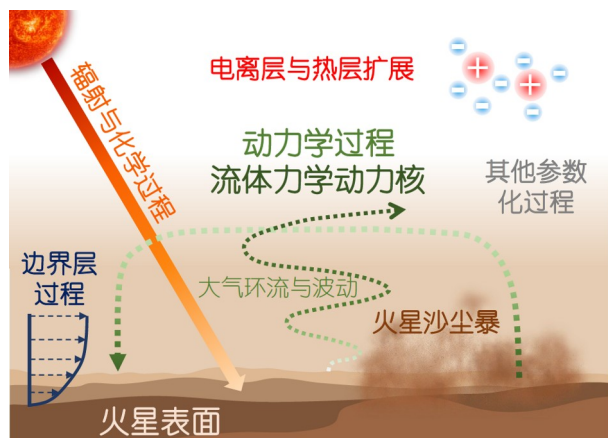


图3 火星全大气模式模型框架

Figure 3 Schematic framework of the Martian whole atmosphere model.

3 基于全大气模式的沙尘暴模拟研究

基于大气数值模式的沙尘暴模拟研究目前主要分为以下两类:(1) 研究沙尘暴效应对大气与空间环境的影响;(2) 研究沙尘暴自身物理过程,如起沙机制、沙尘传输与除沙过程。前者的早期研究中,通常直接给定大气模式中沙尘的全球空间分布并研究其对火星气候的影响。在20世纪90年代,给定的沙尘分布通常假定不随时间变化且在一定的高度内均匀混合^[16~18,20]。而21世纪以来的工作则在沙尘高度分布的处理上更为细致,如根据在扩散混合平衡的假设下将观测中的柱积分沙尘不透明度展开为Conarth剖面^[4,26,44],在保证柱积分沙尘不透明度和观测一致的同时自洽模拟沙尘高度分

布^[45]。MRO/MCS和MGS/TES的观测进一步推进了对于沙尘垂直分布的认知, 研究人员进一步用其临边观测数据给定沙尘的高度分布^[46]。通过调控更真实的沙尘输入从而模拟出大气动力学、大气成分等在沙尘暴活动期间的变化^[47-49]。沙尘观测的进步也加深了我们对分离沙尘层(detached dust layer)的理解, 并推动了数据同化方面的研究^[50]。其参数化描述也取得新的进展, 新的参数化可以使GCM中的沙尘颗粒被输送到更高的高度, 在大尺度水平风输送作用下, 沙尘扩散形成分离沙尘层^[51]。

而聚焦沙尘自身物理过程的模拟工作通常包含完整的沙尘抬升、传输与消除过程, 并以合理的参数化描述。沙尘从火星表面通过动量和热量的交换过程经过行星边界层进入大气。其中, 地面风应力和对流涡旋抬升作用被认为是扬尘的两种主要机制, 并被多种模式考虑在内^[52-54]。例如, 地面风应力的垂直抬升通量通常表述为效率因子和临界表面风应力的函数, 通过调节上述两个参数可以模拟更接近真实的沙尘循环。而对流涡旋抬升作用通常有临界值独立和临界值相关的两种参数化描述: 前者假设沙尘扬起通量与尘卷风成比例为可调节抬升效率, 意味着对流涡旋扬尘主要取决于从地表到大气的热交换以及行星边界层厚; 后者则假设对流涡旋扬尘发生于切向摩擦风速大于弹跳临界摩擦风速条件下。沙尘的输运过程是指在沙尘扬起后至返回地面间受大气风场驱动和重力沉降作用而运动的过程。然而, 由于模式网格分辨率精度所限, 使用大气模拟不可能完全自洽求解沙尘的输运。次网格、亚步长尺度的沙尘输运过程均需要参数化。模式解算的大气风场引起的输运过程之上须要叠加由小尺度过程和湍流引起的参数化垂直输运, 因而不同的模式网格和输运计算格式都会导致参数化的复杂性^[55]。大气中的除尘过程自20世纪70年代水手九号首次观测到全球性沙尘暴的延迟之后便受到广泛关注。火星大气非常干燥, 故主要为干除尘过程, 包括重力沉降作用、大粒子撞击作用、小粒子布朗扩散。这些过程的强度与粒子大小、密度、地形、气象条件等均密切相关, 但重力作用通常最为重要。对半径 $0.5\sim 4\ \mu\text{m}$ 的沙尘粒子而言, 仅考虑重力沉降作用即可得到较好的结果, 所以在全球大气模式中通常仅对重力沉降作用作参数化描述。重力沉降作用主要是考虑黏性对下沉运动粒子产生向上的摩擦与重力平衡、在连续介质模型和分子运动模型间的差别修正(即对应不同的克努森数 Kn)。若考

虑非球形粒子几何修正则下降速度更慢; 而考虑下降过程沙尘作为中冰云凝结核的作用, 则会加速 $10\ \mu\text{m}$ 以上沙尘粒子的下沉。目前已有一些理论工作中尺度模式解释高层沙尘云形成的原因, 但还有待将其参数化应用于大气模式中^[56]。综上所述, 在GCM中合理模拟火星沙尘活动及其影响需要较为复杂的参数化过程以及对沙尘活动更全面的认知。

随着全大气模式的开发, 火星沙尘暴对中高层大气与电离层空间环境变化的影响逐步被揭示。基于早期MGCM-MTGCM单向耦合模式, Bougher等人^[29]对沙尘活动期间火星全球高层大气温度、密度和风场的变化给出了合理估计, 同时该工作也是后续MGS探测计划准备阶段的重要参考。之后, MGCM-MTGCM模式进一步发展, 其模拟结果阐释了MGS和Odyssey观测中北半球冬季低热层增温现象与沙尘活动增强大气环流间的联系^[57]。后续火星快车对大气密度和温度的观测数据证实了MGCM-MTGCM模式对于沙尘暴期间中高层大气参数变化与动力学过程模拟的可靠性^[58]。M-GITM模式基本重现了MAVEN观测中2018年火星全球性沙尘暴爆发期间火星高层大气的温度和密度变化^[59,60]。火星全大气模式M-GITM与逃逸层模式Mars AMPs、磁层模式MF-MHD的耦合模拟工作展示了在全球性沙尘期间二氧化碳粒子逃逸损失的急剧增强, 从而揭示沙尘暴活动在大气长期演化中的潜在作用^[61]。此外, 数据同化系统在火星全大气模式上的应用推动了对沙尘活动与火星大气状态预报方面的研究^[62,63]。

4 讨论与展望

国际上常用的火星全大气模式历经数十年发展, 取得众多卓著的科研成果。欧洲MARS PCM与火星快车探测计划相辅相成, 美国M-GITM模式与MAVEN探测计划相得益彰。如今, 我国正处于行星科学快速发展的关键阶段: “天问一号”大获成功、相关科研产出已硕果累累, 各类地基观测基地相继建立, 后续各类探测计划开展得如火如荼。随着2028~2030年下一个火星探测窗口的临近, 采样返回成为国际上深空探测规划的重点任务。此时, 依托于火星全大气模式的相关模拟研究工作应迎头赶上, 在下一次火星探测计划中起到优化科学价值、提供保障服务的作用。数值模型能有助于深化对沙尘循环及其效应的理解, 如起沙机制、沙尘在大气中传播与消散、对火星大气与空间环境的影

响等。模式的成功开发将进一步服务于数据同化与沙尘活动预测^[63],从而能够在工程上更好地为观测计划的顺利实施提供服务。在天问一号运行期间,相关研究团队基于在轨摄像机对沙尘活动做出成功研判^[64]。“祝融号”火星车也于2022年经历了新一轮沙尘暴^[65],因而未来工作中有必要加深对火星沙尘活动的研究。对此,已有相关卫星计划与在轨观测方案已经提出^[66,67],而模式化研究工作此时应并驾齐驱。目前我国行星科学研究已初具规模,拥有了一批优秀科研人才与研究团队^[68]。在火星大气模式与沙尘暴模拟研究中也有关团队正砥砺前行,取得可喜成果^[6,41,51]。中国科学院大气物理研究所团队已自主研发火星低层大气动力框架,

初步具备模拟火星沙尘的能力^[69]。中国科学院地质与地球物理所与中山大学研究团队已初步完成Mars-WRF和中高层火星大气模式MITM的单向耦合。地球科学中也有一众学者从事全大气模式与数据同化的研究工作。这些工作经验与知识储备皆是发展火星全大气模式的有力支撑。因而,目前我国已具备自主开发火星全大气模式的初步条件,其后需要行星科学、空间科学、大气科学、计算机科学以及相关工程部门的多领域协同合作。模式开发历程势必牵引我国行星科学进阶式发展,保障深空探测工程任务的顺利实施,为各个领域积累研究经验、储备科研人才、并服务未来新一轮的探测计划。

参考文献

- Leovy C, Mintz Y. Numerical simulation of the atmospheric circulation and climate of Mars. *J Atmos Sci*, 1969, 26: 1167–1190
- Bougher S W, Engel S, Hinson D P, et al. Mars Global Surveyor radio science electron density profiles: Neutral atmosphere implications. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 3091–3094
- Bougher S W, Pawlowski D, Bell J M, et al. Mars global ionosphere-thermosphere model: Solar cycle, seasonal, and diurnal variations of the Mars upper atmosphere. *J Geophys Res-Planets*, 2015, 120: 311–342
- Forget F, Hourdin F, Fournier R, et al. Improved general circulation models of the Martian atmosphere from the surface to above 80 km. *J Geophys Res*, 1999, 104: 24155–24175
- González-Galindo F, López-Valverde M A, Angelatsi-Coll M, et al. Extension of a Martian general circulation model to thermospheric altitudes: UV heating and photochemical models. *J Geophys Res*, 2005, 110: 2004JE002312
- 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
- Newman C E, Bertrand T, Fenton L K, et al. 7.24—Martian dust. In: Shroder J F, ed. *Treatise on Geomorphology*. 2nd ed. Oxford: Academic Press, 2022. 637–666
- 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影响: 回顾与展望. 科学通报, 2023, 68: 368–379]
- Leovy C. Weather and climate on Mars. *Nature*, 2001, 412: 245–249
- Yiğit E. Coupling and interactions across the Martian whole atmosphere system. *Nat Geosci*, 2023, 16: 123–132
- Clarke J T. Dust-enhanced water escape. *Nat Astron*, 2018, 2: 114–115
- 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
- Yiğit E. Martian water escape and internal waves. *Science*, 2021, 374: 1323–1324
- Sun Z Z, Rao W, Jia Y, et al. Key mission system design of Tianwen-1 Mars prob (in Chinese). *Aeros Control Appl*, 2021, 47: 9–16 [孙泽洲, 饶伟, 贾阳, 等. “天问一号”火星探测器关键任务系统设计. 空间控制技术与应用, 2021, 47: 9–16]
- 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]
- Pollack J B, Haberle R M, Schaeffer J, et al. Simulations of the general circulation of the Martian atmosphere: 1. Polar processes. *J Geophys Res*, 1990, 95: 1447–1473
- 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*, 1993, 98: 3093–3123
- Wilson R J, Hamilton K. Comprehensive model simulations of thermal tides in the Martian atmosphere. *J Atmos Sci*, 1996, 53: 1290–1326
- Hourdin F. A new representation of the absorption by the CO₂ 15-μm band for a Martian general circulation model. *J Geophys Res*, 1992, 97: 18319–18335
- Hourdin F, Le Van P, Forget F, et al. Meteorological variability and the annual surface pressure cycle on Mars. *J Atmos Sci*, 1993, 50: 3625–3640
- Bougher S W, Dickinson R E, Roble R G, et al. Mars thermospheric general circulation model: Calculations for the arrival of Phobos at Mars.

- [Geophys Res Lett](#), 1988, 15: 1511–1514
- 22 Bougher S W, Roble R G, Ridley E C, et al. The Mars thermosphere: 2. General circulation with coupled dynamics and composition. [J Geophys Res](#), 1990, 95: 14811–14827
 - 23 Haberle R M, Barnes J R, Murphy J R, et al. Meteorological predictions for the Mars Pathfinder lander. [J Geophys Res](#), 1997, 102: 13301–13311
 - 24 Haberle R M, Joshi M M, Murphy J R, et al. General circulation model simulations of the Mars Pathfinder atmospheric structure investigation/meteorology data. [J Geophys Res](#), 1999, 104: 8957–8974
 - 25 Haberle R M, Hollingsworth J L, Colaprete A, et al. The NASA/AMES Mars general circulation model: Model improvements and comparison with observations. In: Published Conference Abstract, International Workshop: Mars Atmosphere Modelling and Observations. Granada, 2003
 - 26 Montabone L, Lewis S R, Read P L, et al. Validation of martian meteorological data assimilation for MGS/TES using radio occultation measurements. [Icarus](#), 2006, 185: 113–132
 - 27 Forbes J M, Hagan M E. Diurnal Kelvin wave in the atmosphere of Mars: Towards an understanding of “stationary” density structures observed by the MGS accelerometer. [Geophys Res Lett](#), 2000, 27: 3563–3566
 - 28 Wan W, Zhou X, Yue X, et al. Interpretation of the altitudinal variation in the Martian ionosphere longitudinal wave-3 structure. [J Geophys Res-Space Phys](#), 2022, 127: e2021JA030096
 - 29 Bougher S W, Murphy J, Haberle R M. Dust storm impacts on the Mars upper atmosphere. [Adv Space Res](#), 1997, 19: 1255–1260
 - 30 Bougher S W, Engel S, Roble R G, et al. Comparative terrestrial planet thermospheres: 2. Solar cycle variation of global structure and winds at equinox. [J Geophys Res](#), 1999, 104: 16591–16611
 - 31 Roble R G. On the feasibility of developing a global atmospheric model extending from the ground to the exosphere. In: Siskind D E, Eckermann S D, Summers M E, eds. Atmospheric Science Across the Stratopause, Geophysical Monograph Series. Washington, DC: AGU, 2000. 53–67
 - 32 Morgan D D, Gurnett D A, Kirchner D L, et al. Variation of the Martian ionospheric electron density from Mars Express radar soundings. [J Geophys Res](#), 2008, 113: 2008JA013313
 - 33 Angelats i Coll M, Forget F, López-Valverde M A, et al. The first Mars thermospheric general circulation model: The Martian atmosphere from the ground to 240 km. [Geophys Res Lett](#), 2005, 32: L04201
 - 34 Bougher S W, Blelly P L, Combi M, et al. Neutral upper atmosphere and ionosphere modeling. [Space Sci Rev](#), 2008, 139: 107–141
 - 35 Bougher S W, Cravens T E, Grebowsky J, et al. The aeronomy of Mars: Characterization by MAVEN of the upper atmosphere reservoir that regulates volatile escape. [Space Sci Rev](#), 2014, 195: 423–456
 - 36 Haberle R M, Kahre M A, Hollingsworth J L, et al. Documentation of the NASA/Ames Legacy Mars global climate model: Simulations of the present seasonal water cycle. [Icarus](#), 2019, 333: 130–164
 - 37 Forget F, Millour E, Bierjon A, et al. Challenges in Mars climate modelling with the LMD Mars global climate model, now called the Mars “Planetary Climate Model” (PCM). In: 7th Mars Atmosphere Modelling and Observations workshop. Paris, 2022
 - 38 Hartogh P, Medvedev A S, Kuroda T, et al. Description and climatology of a new general circulation model of the Martian atmosphere. [J Geophys Res](#), 2005, 110: 2005JE002498
 - 39 Medvedev A S, Yiğit E, Hartogh P, et al. Influence of gravity waves on the Martian atmosphere: General circulation modeling. [J Geophys Res](#), 2011, 116: E10004
 - 40 Richardson M I, Toigo A D, Newman C E. PlanetWRF: A general purpose, local to global numerical model for planetary atmospheric and climate dynamics. [J Geophys Res](#), 2007, 112: 2006JE002825
 - 41 Wu Z, Richardson M I, Zhang X, et al. Large eddy simulations of the dusty Martian convective boundary layer with MarsWRF. [J Geophys Res-Planets](#), 2021, 126: e2020JE006752
 - 42 Putman W M, Lin S J. Finite-volume transport on various cubed-sphere grids. [J Comput Phys](#), 2007, 227: 55–78
 - 43 Medvedev A S, González-Galindo F, Yiğit E, et al. Cooling of the Martian thermosphere by CO₂ radiation and gravity waves: An intercomparison study with two general circulation models. [J Geophys Res-Planets](#), 2015, 120: 913–927
 - 44 Kuroda T, Medvedev A S, Hartogh P, et al. Semiannual oscillations in the atmosphere of Mars. [Geophys Res Lett](#), 2008, 35: 2008GL036061
 - 45 Madeleine J B, Forget F, Millour E, et al. Revisiting the radiative impact of dust on Mars using the LMD global climate model. [J Geophys Res](#), 2011, 116: E11010
 - 46 Guzewich S D, Toigo A D, Richardson M I, et al. The impact of a realistic vertical dust distribution on the simulation of the Martian general circulation. [J Geophys Res-Planets](#), 2013, 118: 980–993
 - 47 Daerden F, Whiteway J A, Neary L, et al. A solar escalator on Mars: Self-lifting of dust layers by radiative heating. [Geophys Res Lett](#), 2015, 42: 7319–7326
 - 48 Medvedev A S, Yiğit E, Kuroda T, et al. General circulation modeling of the Martian upper atmosphere during global dust storms. [J Geophys Res-Planets](#), 2013, 118: 2234–2246
 - 49 Wu Z, Li J, Li T, et al. Gravity waves in different atmospheric layers during Martian dust storms. [J Geophys Res-Planets](#), 2022, 127:

e2021JE007170

- 50 Navarro T, Madeleine J B, Forget F, et al. Global climate modeling of the Martian water cycle with improved microphysics and radiatively active water ice clouds. *J Geophys Res-Planets*, 2014, 119: 1479–1495
- 51 Wang C, Forget F, Bertrand T, et al. Parameterization of rocket dust storms on Mars in the LMD Martian GCM: Modeling details and validation. *J Geophys Res-Planets*, 2018, 123: 982–1000
- 52 Basu S, Richardson M I, Wilson R J. Simulation of the Martian dust cycle with the GFDL Mars GCM. *J Geophys Res*, 2004, 109: 2004JE002243
- 53 Kahre M A, Murphy J R, Haberle R M. Modeling the Martian dust cycle and surface dust reservoirs with the NASA Ames general circulation model. *J Geophys Res*, 2006, 111: 2005JE002588
- 54 Xiao J, Chow K C, Chan K. Dynamical processes of dust lifting in the northern mid-latitude region of Mars during the dust storm season. *Icarus*, 2019, 317: 94–103
- 55 Lian Y, Richardson M I, Newman C E, et al. The Ashima/MIT Mars GCM and argon in the martian atmosphere. *Icarus*, 2012, 218: 1043–1070
- 56 Heavens N G, Richardson M I, Kleinböhl A, et al. Vertical distribution of dust in the Martian atmosphere during northern spring and summer: High-altitude tropical dust maximum at northern summer solstice. *J Geophys Res*, 2011, 116: E01007
- 57 Bougher S W, Bell J M, Murphy J R, et al. Polar warming in the Mars thermosphere: Seasonal variations owing to changing insolation and dust distributions. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L02203
- 58 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
- 59 Elrod M K, Bougher S W, Roeten K, et al. Structural and compositional changes in the upper atmosphere related to the PEDE-2018 dust event on Mars as observed by MAVEN NGIMS. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL084378
- 60 Jain S K, Bougher S W, Deighan J, et al. Martian thermospheric warming associated with the planet encircling dust event of 2018. *Geophys Res Lett*, 2020, 47: e2019GL085302
- 61 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
- 62 Navarro T, Forget F, Millour E, et al. The challenge of atmospheric data assimilation on Mars. *Earth Space Sci*, 2017, 4: 690–722
- 63 Ruan T, Young R M B, Lewis S R, et al. Assimilation of both column- and layer-integrated dust opacity observations in the Martian atmosphere. *Earth Space Sci*, 2021, 8: e2021EA001869
- 64 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
- 65 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]
- 66 Rong Z J, Wei Y, He F, et al. The orbit schemes to monitor Martian dust storms: Benefits to China's future Mars missions (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]
- 67 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]
- 68 Wan W X, Wei Y, Guo Z T, et al. Toward a power of planetary science from a gaint 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]
- 69 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*, 2023, doi: 10.1360/TB-2023-0699 [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, 2023, doi: 10.1360/TB-2023-0699]

Summary for “火星全大气模式与沙尘活动模拟研究: 回顾与展望”

Martian whole atmosphere model and dust activities: Review and prospect

Xu Zhou¹, Yong Wei^{1,2*}, Zhaopeng Wu¹, Zhipeng Ren^{1,2}, Ning Tan³, Siteng Fan⁴, Fei He^{1,2}, Zhaojin Rong^{1,2}, Limei Yan¹, Yuqi Wang^{1,2}, Kai Fan¹ & Jiawei Gao¹

¹ 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 Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

³ Key Laboratory of Cenozoic Geology and Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

⁴ Department of Earth and Space Sciences, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China

* Corresponding author, E-mail: weiy@mail.iggcas.ac.cn

Developing the Martian whole atmosphere model (WAM) helps us understand the Martian land-atmosphere-space coupling comprehensively. In the history of Mars exploration, simulations performed by various Martian atmosphere models played a crucial role in ensuring the success of those Mars exploration missions. On the other hand, more accurate observations also advance the model development. Realizing the importance of dynamics, physics, and chemistry in Mars aerospace motivated scientists to extend the upper boundary of models from the lower atmosphere to the exobase. At the beginning of the 21st century, the prototype of WAM covering the entire atmospheric region was developed, greatly facilitating the relevant investigation. Mars dust is one of the most critical activities that significantly affect the climate and weather in a wide vertical range and thus pose a considerable threat to the safety of Mars surface detectors. The better simulation of dust activities and their impacts on the atmosphere and space should be one of the critical points in the development of the Martian WAM. This paper reviews the development history of the Mars WAM, outlines its construction methods, summarizes relevant scientific research achievements, and discusses the essential scientific research and engineering value of independently developing the Mars WAM from multiple perspectives. We have selected three advanced Martian WAMs developed by international groups to discuss the relationship between their development and the exploration mission at that time, including the MGCM-MTGCM (Mars GCM coupled with Mars Thermosphere General Circulation Model), the M-GITM (Mars Global Ionosphere-Thermosphere Model), and the Mars PCM (Mars Planetary Climate Model). Then, we briefly introduce how to construct a Mars WAM and stress the key technologies in the model development. Furthermore, a preliminary numerical experiment under standard and high-dusty conditions was displayed, simulated by a coupled model of Mars-WRF and MITM (Mars Ionosphere-Thermosphere Model). The one-way coupled model presents a reasonable thermal structure at 0–300 km heights and illustrates the different effects of dust at different altitudes. This will be an important foundation for developing fully coupled Chinese WAM in the near future. With the approach of the next Mars exploration window in 2028–2030, returning samples will become a key task in international deep space exploration planning. At present, relevant simulation research based on the Mars WAM needs to catch up; only then can the model work play a role in optimizing the scientific value and providing guaranteed services in the next Mars exploration plan. Considering the adverse impact of Martian dust on exploration, e.g., the Zhurong Rover hibernated after experiencing a dust storm, we suggest focusing on the research direction of Martian dust activities. Numerical modeling can help to deepen the understanding of the dust cycle and its effects, such as dust initiation mechanism, dust propagation and dissipation in the atmosphere, and impacts on the Martian atmosphere and space environment. These investigations will promote the development of Chinese Mars WAM. At the present stage, Chinese groups have achievements in modeling studies in the Martian dust and have preliminarily established a WAM framework. There is also a group of scholars in earth sciences who are engaged in WAM's research work. As a result, China has the initial conditions to develop a Mars WAM on its own. The following development and application need to involve the cooperation of planetary, space, atmospheric, and computer science. The development process is bound to drive the comprehensive development of planetary science in China, accumulate experience, and cultivate talents for related research fields.

Martian whole atmosphere model, numerical simulation, Martian dust storm, Martian multi-layer coupling

doi: [10.1360/TB-2023-1171](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1171)