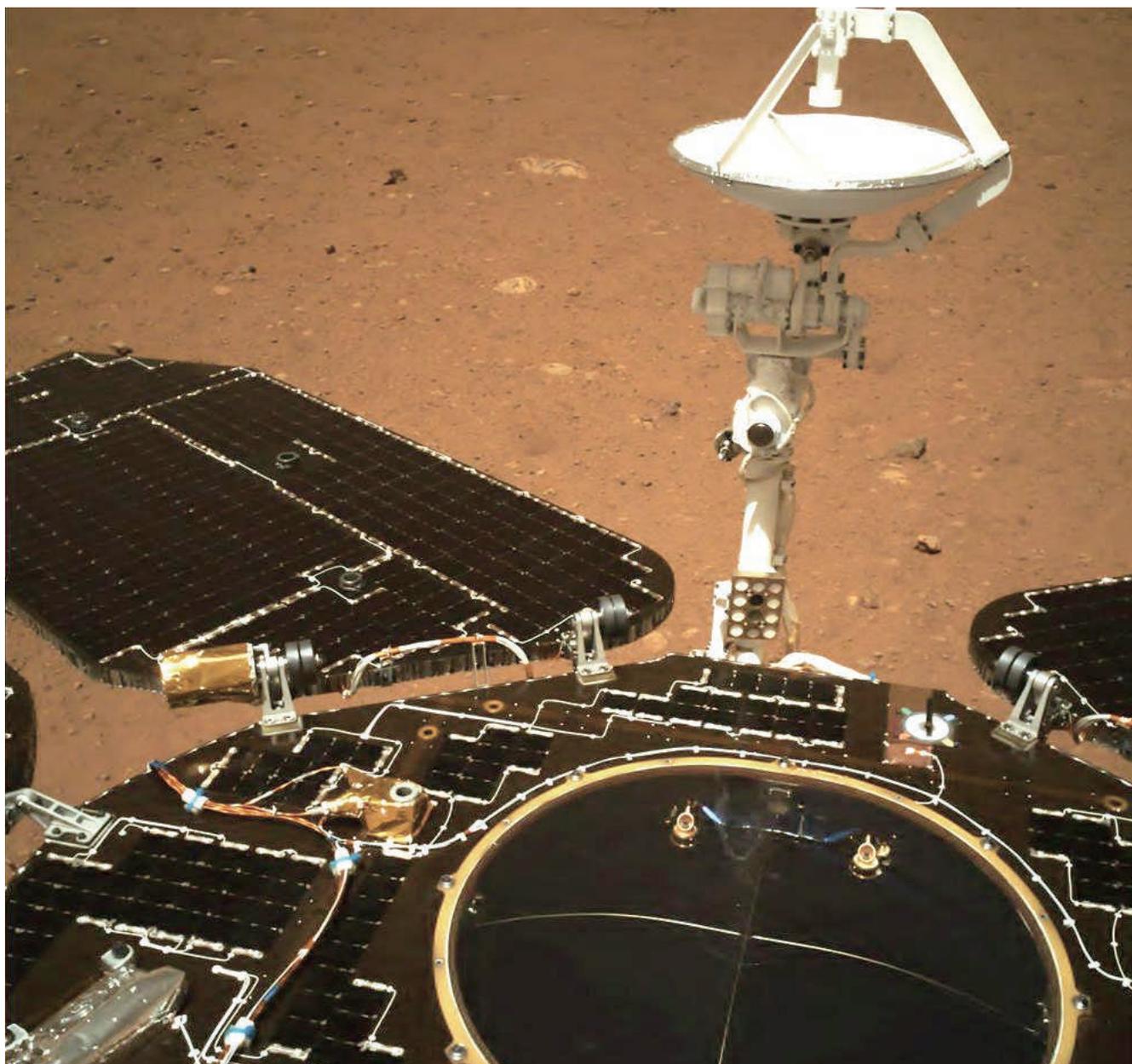


火星北半球探秘之旅

2021年5月15日，我国首次火星探测任务“天问一号”探测器携带的“祝融号”火星车成功降落在火星北半球乌托邦平原（Utopia Planitia）南部，即将展开地面巡视探测。那么，火星北半球与南半球有什么不同？我们为什么要去那里？还有什么未解之谜等待着我们去探索？

撰文 / 包刚 赵宇鹁（中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心）



该图由“祝融号”火星车上的导航相机拍摄，镜头指向火星车尾部。图中可见火星车太阳翼、天线展开正常到位；火星表面纹理清晰，地貌信息丰富。

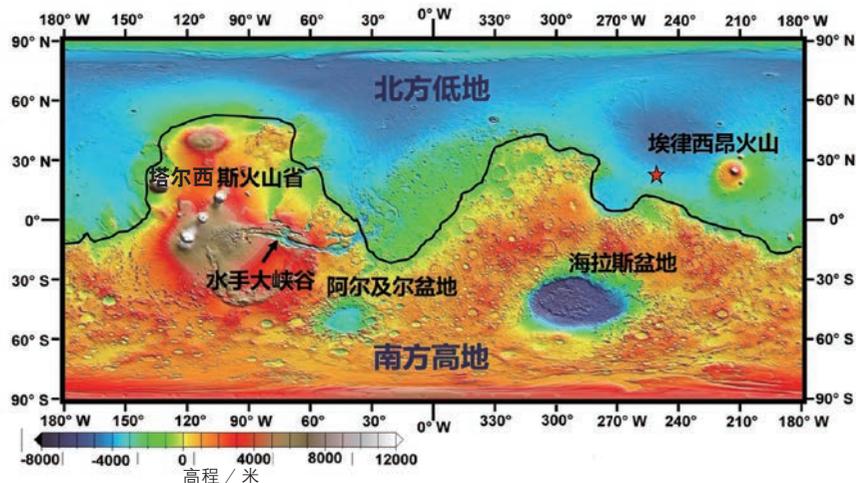
火星南高北低

在火星全球地形图上，最显著的特征是火星南、北半球的地形存在差异，也被称为“南北二分性”（Martian dichotomy）。以南北二分线分界（右图中黑色曲线），南半球是满布撞击坑的高地，其上分布着几座巨大的火山（塔尔西斯火山省），巨型裂谷（水手大峡谷），还有两个巨大的盆地——海拉斯盆地和阿尔及尔盆地；向北则是地势更低，表面更光滑的低地和平原，大型撞击坑相对较少。北方低地仅占火星表面的1/3，这里的火星壳厚度比南方薄了近5千米。

如果从火星北极上空俯视，能够更好地看清北方低地的全貌（右下图）。整个北方低地被合称为“北极平原”，大致呈三角形，占据了全火星40%的面积。它长10600千米，宽8500千米，相当于亚洲、欧洲和大洋洲的面积总和，是太阳系里已知的最大平原（盆地）。北极平原实际上由多个大型平原组成。在水手大峡谷的北部是克里斯平原和阿西达利亚平原，在塔尔西斯火山省的西部是亚马孙平原和阿卡迪亚平原，靠近埃律西昂火山省的则是乌托邦平原和伊希地平原。在北极的极冠，储存着火星当前肉眼可见的水冰和干冰（固态二氧化碳）。

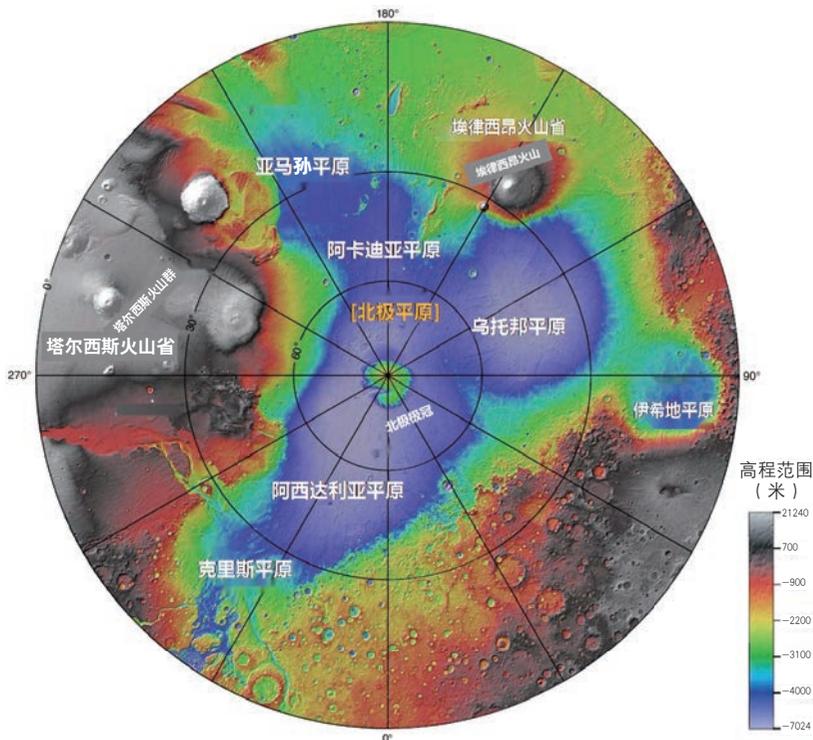
虽然北极平原在较低分辨率的图片上看起来平坦光滑，但其表面其实分布着多种多样的地貌特征，例如：撞击坑、河谷网、锥形地貌、平顶山、圆形凹陷和多边形槽等。这些地貌大多被认为与水的活动有关，或者意味着北极平原物质中富含挥发分。随着探测的不断深入，科学家们还在北极平原发现了大量与冰川活动有关的地貌特征，例如

火星全球地形图和主要地貌特征



在火星上，以6.1毫巴大气压（火星大气的平均气压）的高程定为零点，蓝绿色为低地，红白色为高地。黑线是火星南部高地和北部低地的分界线。★为“祝融号”火星车的着陆区域（坐标为东经109.7°、北纬25.1°）

火星“北极平原”由多个平原组成



锐蚀地形、线状谷底沉积、同心坑填充和弓形脊等（下页图）。这些与冰川有关的地貌几乎全都分布在纬度30°以上的区域，许多地形和纹理也被认为与冰川中冰的升华有关。此外，冰川还会在一些低纬度区域

的火山山峰上出现。冰川可能在火星的表面存在了较长的一段时间，但是当前还需要更多的探测才能更好地理解有关火星上冰川的活动过程。因此，在北方低地的着陆探测可以为科学家提供更多的宝贵信息。

北方低地成因之争

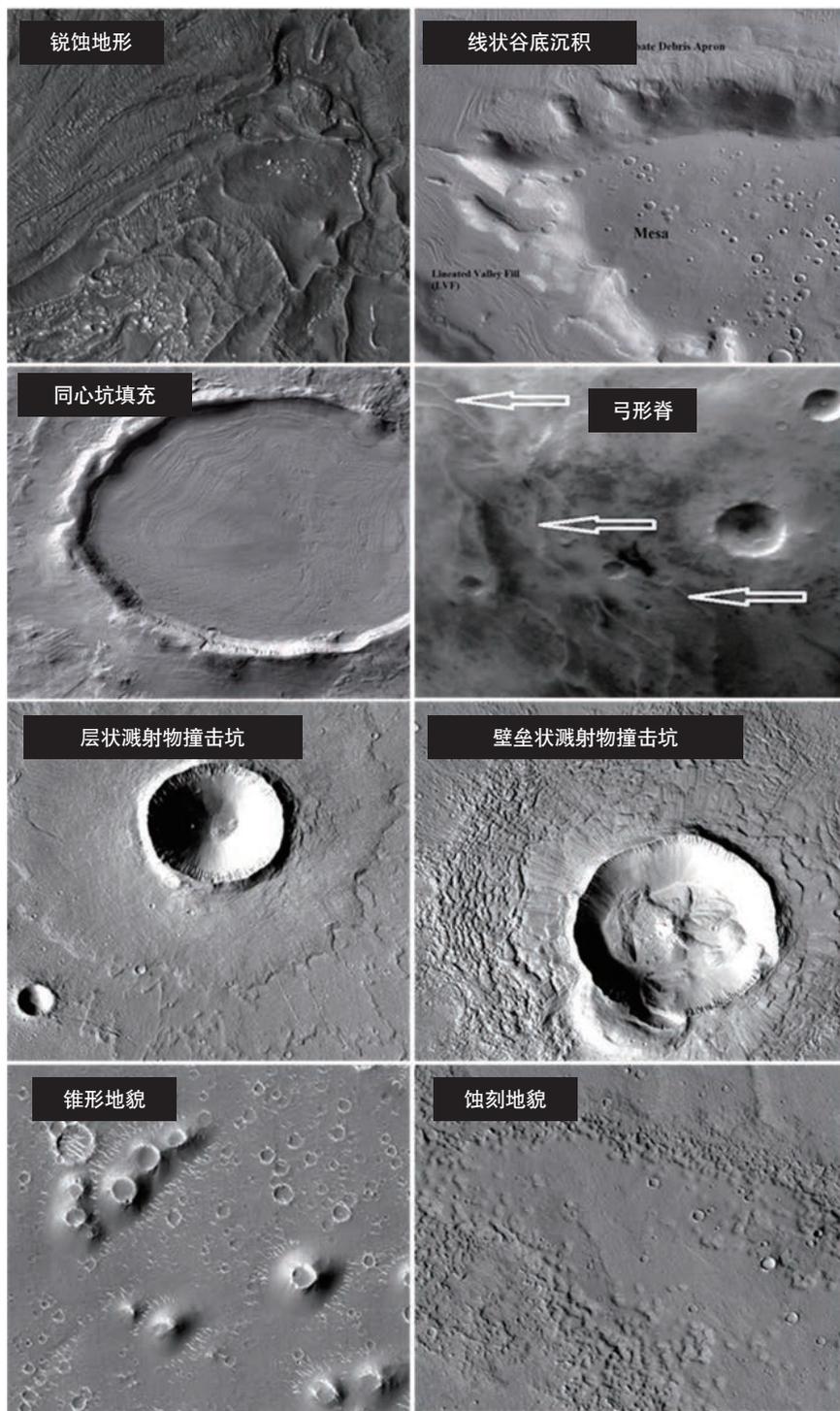
在行星表面，撞击坑直径越大且分布越密集的区域，通常越古老；撞击坑越小、越少的表面，通常较为年轻。据统计，火星上直径大于30千米的撞击坑仅有10%分布在北半球。北方低地为什么看起来这么“年轻”呢？因为这里地势低，不断汇集了来自南方高地、周边火山和平原内部的碎屑物质。这些物质约有1~2千米厚，覆盖在基底的岩石上。

通过仔细分辨高程数据，科学家在看似光滑的北方低地表面之下，发现了大量被沉积物埋藏着的撞击坑（右页上图）。这些被埋藏的撞击坑指示着北方低地的形成时间在约40亿年前的早诺亚纪，甚至比现在南方高地的表面还要古老。也就是说，北方低地在火星历史上很早就形成了。此外，科学家还在不同时期形成的撞击盆地内通过检测是否保留有磁场，从而得出火星磁场消亡的时间大致为41亿年前，这与北方低地出现的时间比较吻合，也因此派生出另一个问题：北方低地的形成与火星磁场的消失有关联吗？

人们之所以会有这样的疑问，是因为刚形成不久的火星也曾拥有过磁场，而且其强度还与地球磁场非常相似。不过，火星磁场后来又神秘地消失了，科学家认为罪魁祸首可能是一个巨大的天体，它撞击到火星表面，破坏了火星内部的热循环，从而导致火星磁场的消失。

关于北方低地的形成原因，目前仍有争议。当前，撞击成因假说占主导，主要分为“一次撞击”和“多次撞击”两种模型。一次撞击是指大约40亿年前，一次非常大的撞击过程形成了北方低地（右页下图）。

北方低地的主要地貌类型

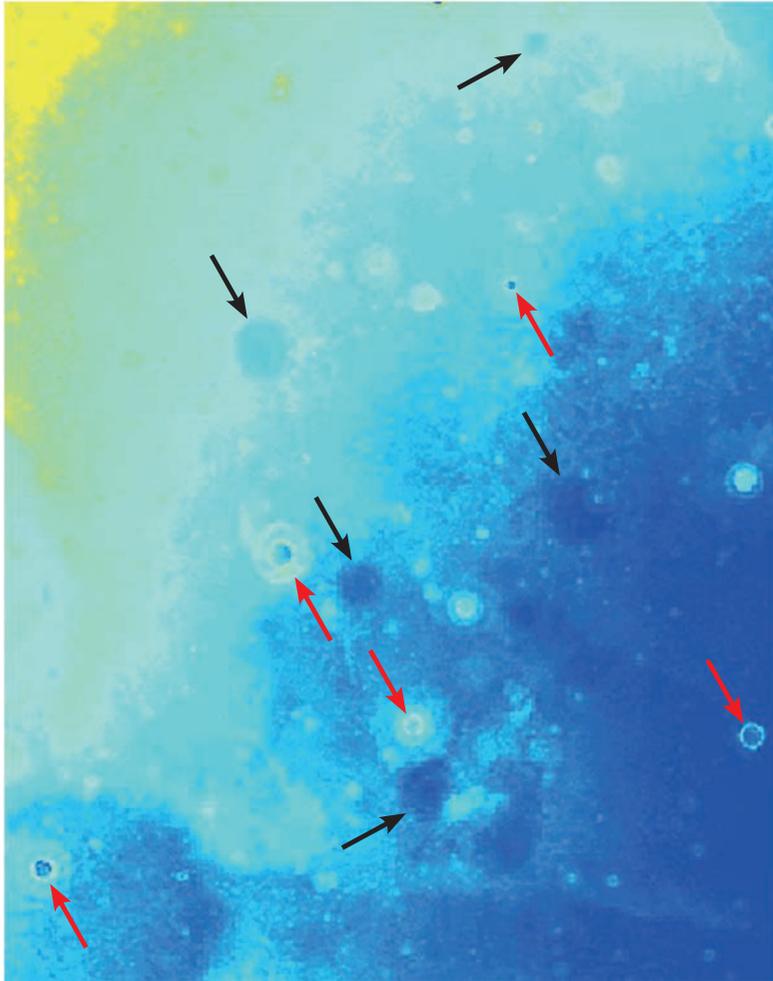


多次撞击则是指北极平原是由多次撞击累积形成的，因为整个平原的边缘呈现不规则形态。

但该假说的反对者则认为，如果北方低地真是撞击形成的，那么这些撞击平原的边缘和撞击形

成的溅射物在高度上应该高于南部高地，但这与观测事实不符。国际天文学联合会 (International Astronomical Union) 至今还未认可北极平原为撞击盆地。一些科学家还有另一种解释——火星幔对流。

火星北方低地被埋藏的撞击坑



黑色箭头指的是无法观测到撞击结构的撞击坑，红色箭头指的是可以观测到撞击结构的撞击坑（底图为火星高程 MOLA 图；Buczkowski 等，2005）。

火星早期经历巨大撞击形成北极平原的假想图



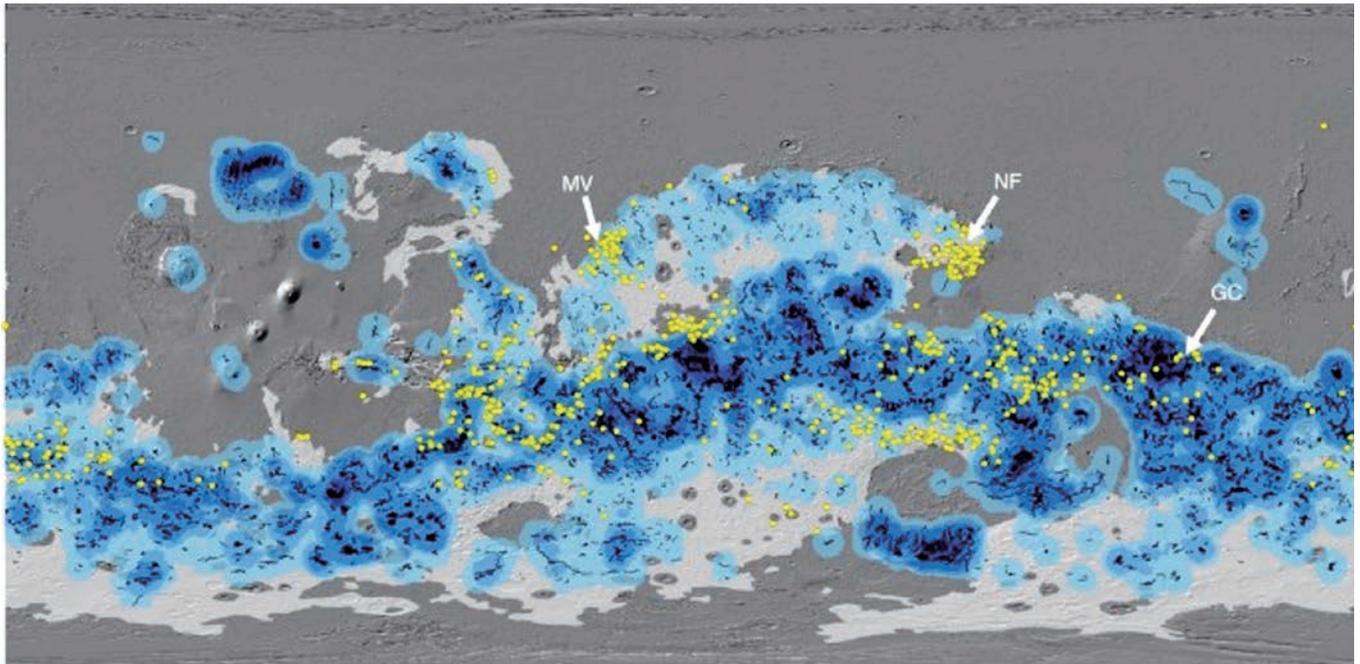
他们认为，在火星地质历史的早期，可能存在过板块运动，使得北部形成了巨大的凹陷。但直到现在，科学家也还没有观察到火星板块构造的证据，这很大程度上削弱了对这一假说的支持度。事实上，即使在地球上，科学家也尚未完全理解地球的地幔过程是如何影响板块构造的，因此在火星上研究类似过程更加困难。

古海洋去哪了？

由于北方低地形成的年代很早，并且在火星南部高地和南北二分线附近存在许多河谷网络（下页上图），因此有人提出了火星古海洋假说。假说认为，41 亿 ~ 38 亿年前，当火星表面还广泛存在着液态水的时候，火星南部水系中的水，从高地势流向低地势，最终汇入北部低地平原区，从而形成一个巨大的古海洋。古海洋填充了整个北极平原，并且沉淀出了现在覆盖在北极平原表面的沉积物。火星古海洋的支持证据主要来自火星地形地貌：南北二分线、河谷网和二分线附近的许多三角洲等，还有一些地形证据甚至被解释为巨大的海啸作用。火星表面矿物和火星大气中检测到富含较重的氢、氘等同位素特征，也支持火星大气的持续逃逸。也就是说，火星曾经出现过海洋和更浓密的大气，但它们逐渐离开火星逃逸到太空中去了。

然而问题远没有这么简单。如果火星曾经存在古海洋，那么它有多少水？海洋持续存在了多久？现在没人能说得清。不同的估算获得的海洋深度从 3 米到 2 千米不等，持续的时间也长短不一。并且，如果南北二分线是古海岸线，那么为什么在不同地区这些海岸线的高程并不均一，而是差异巨大？虽然许多假说提出火星北极的偏移变化、塔尔西斯火山省隆起

火星河谷网络分布图



目前，火星表面已识别出的水系支流有 59423 条，归为 66 个河谷网（蓝色区域；Bishop 等，2018）。黄色圆点是轨道器检测到的黏土矿物位置。

等用于解释这些高程差异，但暂时还不足以令人信服。更多的困扰来自古气候、表面物质和假想海水的去向。

火星表面的古海洋假说需要一个如地球般温暖湿润的气候条件，但早期的火星如何能够保持足够的温度使液态水广泛分布，已经让科学家伤透脑筋。要知道，早期火星所获得的太阳辐照能量只有现在的 70%，因为那时的太阳处于形成初期，比现在的更弱更暗。而那时火星的大气到底是如现在这样稀薄还是更为浓密？现在依然没有定论。也有科学家提出了新的模型，认为火星从来没有过持续的温暖湿润，火星上的水大部分时间都是被冰冻起来的。间歇性的变暖使得局部的冰雪融化，形成洪水，冲刷出河谷地貌。此外，虽然北极平原上有厚厚的沉积物，但通过研究被撞击坑挖掘出的深部物质（可能代表了被

埋藏的古老物质），也没有发现大量的含水矿物来支持巨大的古海洋的假说。古海洋的消失依然是一个谜——海水究竟去了哪里，是转入更深的地下还是通过大气逃逸到太空？目前都还没有定论。

关于火星古海洋的争论还会持续很久，科学家将需要更多类型的探测数据来寻找这一关键问题的答案。

北方低地的着陆 / 巡视探测

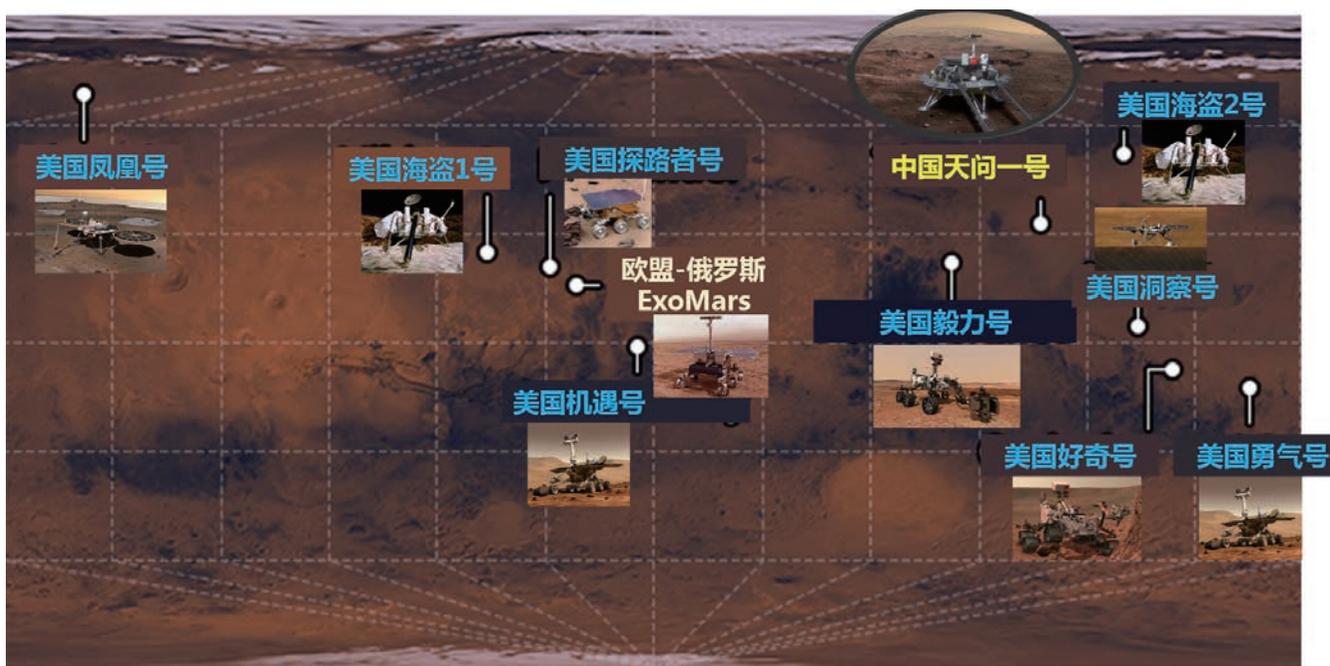
北方低地由于广泛分布着厚厚的火星尘埃，使得在火星上空飞行的轨道器探测困难重重，特别是难以从遥感数据上获得尘埃下岩石或矿物的物质组成信息。这也使得北方低地的探测研究程度相比南方高地低得多。

在人类对火星探测的早期，北方低地是着陆探测的首选目的地。主要原因是地势更低，使得着陆器

有足够的时间减速。另外，北方地势看起来更光滑平坦，更有利于着陆器的着陆和火星车的移动。目前已经成功登陆火星北部低地的探测器有早期的海盗 1 号和海盗 2 号着陆器，探路者任务携带的旅居者号火星车，凤凰号和洞察号着陆器（右页图）。在这些探测器里，海盗号的两个着陆器和旅居者号火星车带来了北方低地地表的组成信息。凤凰号则着陆在北极冰盖外缘的冻土平原上，对当地的水和冰以及土壤组成开展了重要的观察。洞察者号在埃律西昂平原着陆，但主要开展地球物理方面的探测，未能提供当地的物质组分信息。

早期的着陆器，虽然目标是易于着陆和巡视移动的北方低地区域，但因为当时缺乏遥感数据，特别是高分辨率的数据，所以直到着陆后才发现，这里遍地是厘米至米级的石块，并不适合着陆和巡视探测。

已有和未来的火星探测器着陆点分布图



蓝色为美国已经成功着陆的着陆器或火星车。中国的祝融号火星车已经着陆火星。欧盟-俄罗斯联合开发的 ExoMars 火星车计划推迟到 2022 年发射。

在对着陆点的岩石和土壤的探测中，也发现这些岩石表面覆盖着尘埃，以岩浆岩为主，并没见到河流活动的证据。从探路者号之后，美国火星探测的着陆点主要集中在南部高地，因为那里地表的尘埃较少，年龄也更古老，也更可能探测到早期火星的信息，例如水和生命。因此，美国第二代（勇气号、机遇号）和第三代火星车（好奇号、毅力号）均未再踏足过北部低地。而北极平原区埋藏的秘密，也静静等待着下一个新探索者的造访。

祝融号的探测目标

目前，火星北部低地还有很多重要的科学问题亟待解决：不同沉积盆地的地层结构、含水矿物（例如黏土和层状硅酸盐等）的分布、诺亚纪（4.5 亿~3.7 亿年前）或西方纪^{*}（3.7 亿~2.9 亿年前）是否存

在海洋、是否曾经存在古老海岸线、河流沉积物的分布、冰川沉积物的分布、西方纪的火山活动、可能保存生命遗迹物的古环境等。

祝融号火星车搭载了 6 台科学载荷，包括火星表面成分探测仪、多光谱相机、导航地形相机、火星车次表层探测雷达、火星表面磁场探测仪以及火星气象测量仪。这些科学仪器将和天问一号轨道器的探测相互配合，完成 4 个主要的科学探测目标：火星巡视区形貌和地质构造探测，火星巡视区土壤结构（剖面）探测和水冰探查，火星巡视区表面元素、矿物和岩石类型探查以及火星巡视区大气物理特征与表面环境探测。

此前，美国的一些探测器早已发现了水曾经存在的证据，为什么我国的这次火星探测任务还要把寻找水作为重要目标呢？

这是因为，有水就有可能存在生命，目前人类还没有在火星表面发现液态水，因此，寻找水依然是非常重要的。美国此前发现水的证据是通过轨道器上搭载的探测雷达来判断的，并且发现的位置都位于极区附近。目前的普遍观点认为，低纬度区域的地下是不可能存在水的。而天问一号的着陆区域在北纬 30° 以内，如果通过探测雷达可以发现地下水存在，那么这会是颠覆性的认识。并且，如果未来有载人探测，比较优选的区域是赤道附近的平原区域，如果这里存在可用的水或冰，将为载人探测提供强有力的支持。寻找水，无论在科学上和工程上都同样重要。

祝融号寄托着中华民族乃至全人类向未知探索的美好愿望，将为我们揭开火星北部低地的神秘面纱，让我们拭目以待。责任编辑 / 闫凯

^{*} 火星地质历史主要分为 3 个阶段：诺亚纪（4.5 亿~3.7 亿年前）、西方纪（3.7 亿~2.9 亿年前）、亚马孙纪（2.9 亿年前至今）。研究表明，火星上液态水可能的存在时间是诺亚纪或西方纪，因此，如果存在大规模水体（海洋），也只可能是在诺亚纪或西方纪。