

doi:10.3799/dqkx.2016.505

火星古湖泊研究的现状、问题与展望

赵健楠, 肖 龙*

中国地质大学地球科学学院行星科学研究所, 湖北武汉 430074

摘要:火星表面的古湖泊地貌能够反映火星古气候和古环境的特征及变化,对于研究火星是否曾经存在宜居环境具有重要意义。随着中国火星探测计划的提出和实施,详细了解火星古湖泊的研究进展尤为重要。总结了火星古湖泊的研究现状,重点阐述了当前对火星古湖泊的沉积地貌、矿物成分、形成年龄、分布特征等方面的研究进展。在综合分析前人研究成果的基础上,提出火星古湖泊研究中存在的主要问题,认为未来应着重在古湖泊的详细调查与地质填图、古湖泊的后期改造作用、其他类型古湖泊的识别分析以及火星与地球古湖泊的对比等方面开展研究。

关键词:火星;古湖泊;遥感;地貌学;沉积物;行星地质学。

中图分类号: P691

文章编号: 1000-2383(2016)09-1572-11

收稿日期: 2016-01-17

Achievements, Issues and Prospects in Study of Martian Paleolakes

Zhao Jiannan, Xiao Long*

Planetary Science Institute, School of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Paleolakes on Martian surface have attracted great interests of researchers as they contain information on ancient aqueous environment of Mars and are important for the detection of habitable environment on Mars. With the implementing of Chinese Mars exploration program, it's of great significances to review the achievements in Martian paleolake study. We summarize the sedimentary geomorphology, mineral compositions, activity periods and global distribution of the paleolakes. On this basis, we discussed the unresolved questions in paleolake study and proposed that future studies should focus on the detailed investigation and geologic mapping of paleolakes, post-lacustrine modification processes, identification of other paleolake types and the comparative study of Martian and terrestrial paleolakes.

Key words: Mars; paleolake; remote sensing; geomorphology; sediments; planetary geology.

火星是地球的近邻,也是太阳系内与地球最为相似的行星。自 1960 年前苏联发射首颗火星探测器至今,人类已经实施了 40 多次火星探测。这些任务关注的重点之一是探测火星上与水和生命有关的信息。目前的探测结果表明,火星的两极依然有大量水冰存在(Kieffer *et al.*, 1976; Titus *et al.*, 2003; Bibring *et al.*, 2004),中低纬度的局部地区可能存在短时的液态水活动(Malin and Edgett, 2000; Johnson *et al.*, 2014; Martin-Torres *et al.*, 2015; Ojha *et al.*, 2015)。在火星地质历史时期有大量地表水存

在,且其对火星地表的塑造起了重要作用,至今在火星表面依然保留了河床、三角洲、峡谷以及湖盆等可能由地表水活动形成的地貌(Baker, 2006; McSween, 2006; McEwen *et al.*, 2007)。其中,古湖泊是火星地貌研究的热点之一,它是火星地质环境历史的见证者。古湖泊的地貌特征能够揭示湖泊存在时地表水的活动情况;古湖泊沉积物的矿物组成能够反映古气候环境特点;古湖泊的年龄与分布指示了火星地表水的存在时间与分布范围,以及气候环境的变迁历史(肖龙, 2013)。因此,对火星古湖泊的研

基金项目:国家自然科学基金项目(No.41373066);中央高校基本科研基金(No.CUG130106);高等学校博士学科点专项基金(No.20130145130001)。

作者简介:赵健楠(1990-),男,博士研究生,主要从事行星地质学研究。E-mail: jnzha@cug.edu.cn

* 通讯作者:肖龙, E-mail: longxiao@cug.edu.cn

引用格式:赵健楠,肖龙, 2016.火星古湖泊研究的现状、问题与展望.地球科学, 41(9): 1572-1582.

究对于了解火星的古气候、古环境、宜居性以及寻找火星生命都具有重要的意义。

研究者对火星古湖泊的识别与研究始于对“水手9号”及“海盗号”影像的分析。虽然这些探测器获得的影像分辨率较低,很难对火星表面的古湖泊进行全面而详细地识别与调查,但根据所发现的峡谷网等地貌特征,以及对火星物理条件和气候模型的研究,学者认为火星表面曾经可能有河谷和湖泊存在(Sagan and Mullen, 1972; Sagan *et al.*, 1973; Toon *et al.*, 1980; Haberle and Jakosky, 1990; Baker *et al.*, 1991; McKay and Davis, 1991; Clifford, 1993)。同时,由于火星表面的撞击坑地势低洼,很可能成为水的汇集区域,因而可以对已存在的撞击坑进行分析,判断撞击坑内是否曾经存在湖泊。据此方法,早期的研究者在火星表面识别了179个撞击坑古湖泊(Goldspiel and Squyres, 1991; De Hon, 1992; Forsythe and Zimbelman, 1995; Forsythe and Blackwelder, 1998; Cabrol and Grin, 1999)。

近年来,“火星全球勘测者(mars global surveyor, MGS)”、“火星奥德赛(mars odyssey)”,“火星快车(mars express)”和“火星勘测轨道飞行器(mars reconnaissance orbiter, MRO)”等探测器相继成功发射并开展探测,获取了大量高分辨率的影像和光谱数据,使得对古湖泊的全面调查和详细研究成为可能。目前,全球在火星上已识别的古湖泊超过400个(Goudge *et al.*, 2012a, 2015, 图1),前人对这些古

湖泊的形貌特征、类型与分布、矿物成分、形成年代等多个方面开展了研究,取得了大量的研究成果。我国的行星科学研究起步较晚,目前国内尚未对火星古湖泊开展系统的研究,而随着我国火星探测计划的提出和实施,详细了解当前国际火星研究的进展变得尤为重要。本文将着重对火星古湖泊的研究成果进行总结,并在此基础上探讨古湖泊研究中存在的问题,提出未来的研究方向和展望,希望能为我国的火星探测任务和科学目标提供参考。

1 当前火星古湖泊研究的主要成果

1.1 古湖泊的识别特征

目前对火星全球古湖泊的研究主要基于卫星遥感数据,特征性的地貌是识别火星古湖泊的主要依据。这些地貌特征主要包括有峡谷相连的撞击坑、湖相三角洲、阶地、层状沉积和暴露的湖底沉积等。2012年8月至今,“好奇号”火星车对盖尔撞击坑的就位探测,为古湖泊的确定提供了更加详细的数据。

1.1.1 有峡谷相连的撞击坑 大多数古湖泊都具有水流入或流出的通道,而撞击坑地势低洼,有利于水的汇集与贮存。因此,具有峡谷相连的撞击坑是古湖泊识别的重要标志之一(Forsythe and Blackwelder, 1998)。例如,位于火星尼利槽沟(Nili Fossae)地区的耶泽洛撞击坑(Jezero Crater)(77.7°E, 18.4°N, 图2a)存在3条峡谷与之相连。利用火星轨

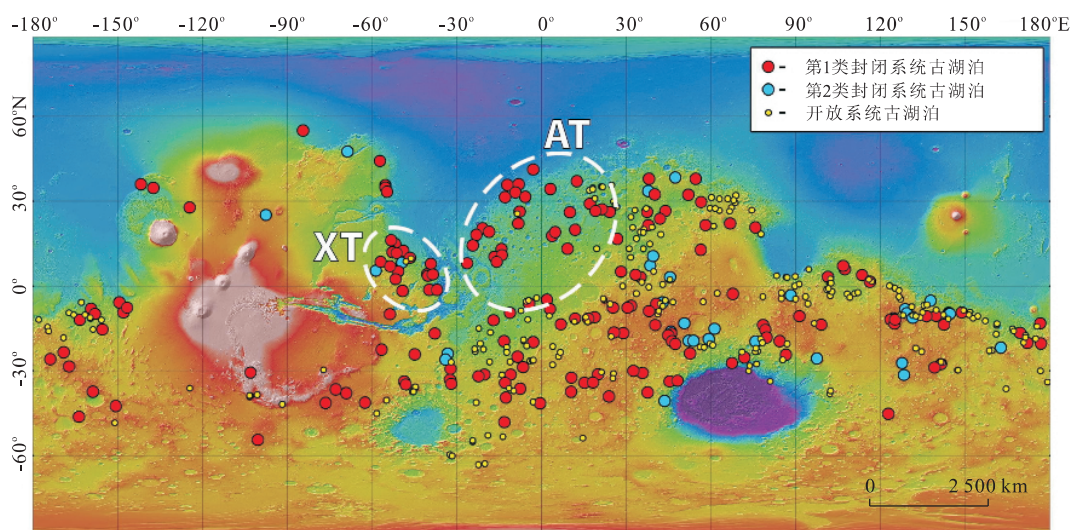


图1 火星全球古湖泊分布

Fig.1 Global distribution of martian paleolakes

标有AT和XT的白色虚线范围内分别为第1类封闭系统古湖泊高度集中的阿拉伯高地(Arabia Terra)和赞西高地(Xanthe Terra)。底图为火星轨道器激光高度计(mars orbiter laser altimeter, MOLA)高程图;据 Goudge *et al.*(2015)

道器激光高度计 (mars orbiter laser altimeter, MOLA) 获得的高程数据, 得到位于西北侧的 2 条峡谷高程较高, 峡谷与撞击坑连接处高程约 $-2\ 300\text{ m}$, 且沿远离撞击坑的方向高程逐渐升高, 而位于东侧的峡谷高程低于 $-2\ 400\text{ m}$, 沿远离撞击坑的方向高程逐渐降低. 因此, 如果这些峡谷均为水流形成, 则西北侧的两条峡谷应为水流入的通道, 而东侧峡谷为水流出的通道, 同时结合撞击坑底的高程 (平均高程约 $-2\ 600\text{ m}$) 以及已发现的碳酸盐、层状硅酸盐矿物 (Goudge *et al.*, 2012a) 可以推断, 该撞击坑中曾经贮存有大量液态水, 形成湖泊.

1.1.2 湖相三角洲 湖相三角洲 (图 2b) 是由水流携带的碎屑物质进入湖泊中稳定水体时沉积形成 (Cabrol and Grin, 1999). Cabrol and Grin (2001) 利用“海盗号”影像数据, 识别了 75 个可能存在的三角洲, 并将其分为扇状、伸长状和叶状三大类, 同时还存在一些过渡类型. 三角洲的形貌可以反映水流所携带物质的粒径组成、水动力条件以及三角洲形成时的环境条件 (如冰下、静水、地表环境) 等, 对于古湖泊的识别及其形成环境的探讨具有极为重要的意义 (Tokano, 2005). 例如, 火星上的一些三角洲具有较大的分布面积 (如位于马丁峡谷 (Ma'adim Vallis) 一端的三角洲可达 250 km^2), 这指示了三角洲形成时具有较为稳定的环境条件. 而在地球上, 如此大规模的三角洲需要数千年时间形成. 因而, 火星上大规模三角洲的存在可能指示了火星表面曾经有大型湖泊稳定存在. 但需要注意的是, 并非所有的扇状沉积都是由水流作用形成, 崩塌和风的作用也可能形成

扇状沉积, 需要仔细分辨这些扇状沉积与湖相三角洲的形貌差异.

1.1.3 阶地 某些撞击坑或地势低洼处存在的阶地也是古湖泊的识别特征之一 (图 3a). 阶地可能是由早期的地表或撞击坑底部被水流侵蚀并向盆地外部搬运而形成 (Carr, 2006). 但也有一些阶地是由撞击坑边缘的物质在重力作用下滑塌形成, 而与水流作用无关 (Tokano, 2005; Carr, 2006). Leverington and Maxwell (2004) 认为, 撞击坑内的阶地也可能是岩浆湖中的岩浆撤退形成. 因此, 需要利用高分辨率影像数据, 对阶地及其相关地貌特征进行详细分析, 区分不同成因的阶地. 一般而言, 撞击坑中连续而平滑的环状阶地可能与流水的侵蚀有关.

1.1.4 层状沉积 随着高分辨率影像的获得, 层状沉积在火星表面被广泛发现 (图 3b). 层状沉积的形成可能与风、冰川、火山以及水的作用相关, 因此, 层状沉积并非判断古湖泊存在的首要证据 (Tokano, 2005). 利用层状沉积进行古湖泊识别需要对层状沉积的形貌、分布位置等进行详细的研究. 一般而言, 在形貌方面, 湖泊沉积形成的层状沉积物与其他地质过程形成的层状沉积相比具有以下特点: (1) 在高程上, 湖泊层状沉积物位于湖泊外流水道的水位之下, 同时, 层状沉积应在其他任何发生表面改造的地层单元之下; (2) 层状沉积在整个盆地内出露的剖面上应该是连续的; (3) 出露的层应该只分布在古湖泊之内 (Goudge *et al.*, 2012a) 或其他低洼区. 通过对层状沉积的形貌特点和矿物成分的研究, 可以得到古湖泊内沉积物的体积, 推算出古湖泊在活动时期

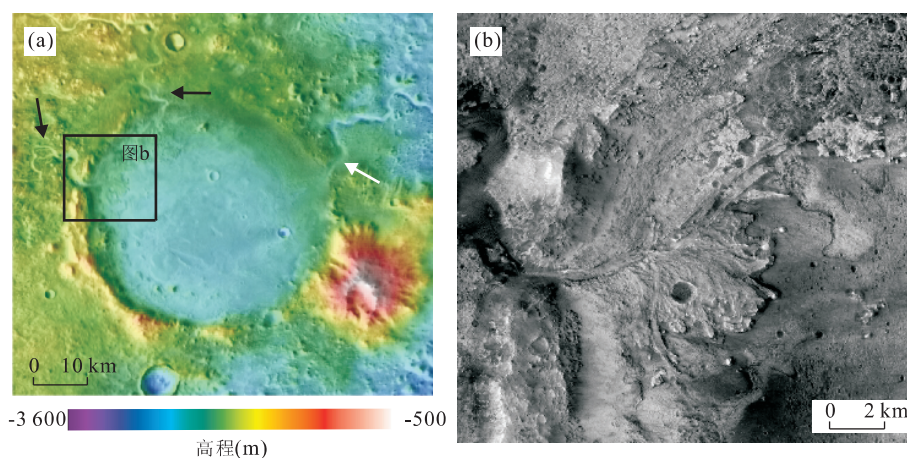


图 2 耶泽洛撞击坑及与之相连的峡谷 (a) 和耶泽洛撞击坑内的湖相三角洲 (b)

Fig.2 Jezero crater and its inlet and outlet valleys (a) and lacustrine delta in Jezero crater (b)

图 a 底图为 MOLA 高程图像叠加在热辐射成像系统 (thermal emission imaging system, THEMIS) 日间影像上, 黑色箭头指示的两条峡谷为水流入的通道, 白色箭头指示的峡谷为水流出的通道; 图 b 底图为背景相机 (context camera, CTX) 影像, 编号为 D14_032794_1989_XN_18N282W

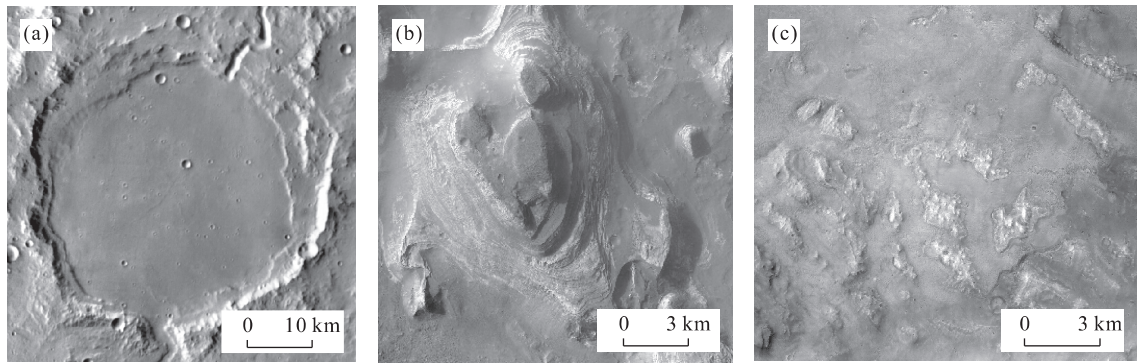


图 3 火星古湖泊中的阶地(a)、层状沉积(b)以及暴露的湖底沉积物质(c)

Fig.3 Terraces (a), layered deposits (b) and exposed floor materials (c) in martian paleolakes

a.174.1°W,14.2°S, THEMIS 日间影像; b.位于特贝撞击坑(Terby Crater), 74.3°E, 27.5°S, CTX 影像: B02_010259_1522_XI_27S285 W; c. 1.8°W, 4.4°S, CTX 影像: P11_005291_1758_XN_04S001 W

的水量(水位),同时,也可以反映古湖泊活动的周期性,揭示古气候与古环境的变化(Cabrol and Grin, 2003)。例如,盖尔撞击坑(Gale crater)中的层状沉积被认为是古湖泊存在的证据之一,层状沉积的成分显示出由粘土矿物向硫酸盐矿物的变化层序,结合年代学研究结果,Milliken *et al.*(2010)认为这可能反映了火星气候在诺亚纪—西方纪之交(距今 3.7 Ga左右)由湿润向干燥转变。“好奇号”对该撞击坑中层状沉积物的就位探测表明,撞击坑中曾有古湖泊周期性存在,且湖泊的活动周期为 100 ~ 10 000 a(Grotzinger *et al.*, 2015)。

1.1.5 暴露的湖底沉积 暴露的湖底沉积物是位于古湖盆底部的浅色、多丘、被侵蚀的物质,它们一般被发生表面改造的单元所包围或位于这些单元之下(Goudge *et al.*, 2012a; 图 3c)。能证明撞击坑底部的物质为湖泊成因的证据主要有:(1)这些沉积物一般位于任何其他经历了后期改造的地层单元之下,且常常被后者包围;(2)沉积物一般为明亮至中等色调,可能为蒸发沉积形成的硫酸盐矿物(Glotch *et al.*, 2006; Noe Dobrea *et al.*, 2006);(3)这些沉积物只分布于撞击坑内部(Goudge *et al.*, 2012a)。但是,应注意区分撞击坑内的中央峰或中央峰环物质,避免将其与湖泊沉积物相混淆。

1.2 古湖泊的分类

在地球上,对湖泊的分类可以根据湖泊的物理、化学、生物过程以及区域分布、形成与演变过程的特点等进行划分(Allen and Collinsen, 1986; 窦鸿身等, 1996; 姜加虎和王苏民, 1998)。但对于火星,笔者对其地质历史时期的物理、化学环境的认识有限,且目前并未发现生物存在的有力证据。因此,研究者主

要通过分析已获得的火星遥感数据,以地貌学为基础对古湖泊进行分类。例如,根据湖泊地形的产生原因分为构造湖泊、火山湖泊、撞击坑湖泊(Tokano, 2005);根据湖泊盆地与峡谷的相对位置分类(De Hon, 1992);根据水动力学体系分类(Cabrol and Grin, 1999)等。其中,较多采用的方法是根据由河道与湖泊盆地组成的河湖系统的特征,判断湖泊的水动力学体系,将古湖泊分为 3 类:封闭系统古湖泊(或称为具有封闭盆地的古湖泊)、开放系统古湖泊(或具有开放盆地的古湖泊)以及湖泊链系统(Cabrol and Grin, 1999)。封闭系统是指只有水流入的通道,而未发现流出通道的古湖泊系统;开放系统是指同时具有水流入和流出通道的古湖泊系统,如图 2a 中的耶泽洛撞击坑;湖泊链系统则是由一系列古湖泊通过一个或多个河谷相连,构成一整套湖泊系统,而位于该系统最末端的湖泊可能是开放或封闭系统。对于封闭系统古湖泊, Goudge *et al.*(2015)将其分为 2 类:第 1 类为具有较短的供给河道的封闭系统古湖泊,第 2 类为具有较长的供给河道的封闭系统古湖泊,并以 20 km 作为供给河道长度的划分界限。如此分类是考虑到供给河道的长度可能与古湖泊水的来源及湖泊寿命相关。

1.3 古湖泊沉积物的矿物成分

对火星古湖泊矿物成分的研究,主要依赖于对火星遥感光谱数据的分析。目前可利用的光谱数据主要来源于“火星全球勘探者”上搭载的热辐射光谱仪(thermal emission spectrometer, TES, 空间分辨率每像素 3 km)、“火星快车”探测器上的可见光及红外矿物制图光谱仪(Observatoire pour la Mineralogie, l'Eau, la Glace et l'Activite, OMEGA, 空间

分辨率每像素 0.3~4.8 km),“火星奥德赛”探测器热辐射成像系统(thermal emission imaging system, THEMIS, 空间分辨率每像素 100 m)以及“火星勘测轨道器”上的火星专用小型侦察影像频谱仪(compact reconnaissance imaging spectrometer for mars, CRISM, 空间分辨率每像素 18 或 36 m)。在实际研究工作中,由于大多数古湖泊的面积较小,因此对其矿物成分的分析,需要利用具有较高空间分辨率的 CRISM 数据。同时,CRISM 数据为高光谱数据,也有利于复杂矿物成分的识别(李志忠等, 2015)。就位探测获得的成分信息可以与轨道器获得的数据相互验证。

目前,在火星表面已识别出的存在湖泊沉积物的 100 多个古湖泊中,只有近 20 个古湖泊中发现了与水的改造相关的矿物(Goudge *et al.*, 2012a, 2015),其余的古湖泊并未显示出与周围地区有明显的矿物成分差异,也未发现较特殊的矿物成分(如含水矿物等)。可能导致这一情况的原因有:(1)目前 CRISM 获取的高分辨率光谱数据依然较少,许多古湖泊并没有 CRISM 数据覆盖;(2)古湖泊表面薄层的后期改造物质,如风成灰尘覆盖物,掩盖了水改造矿物及蒸发盐矿物的光谱特征,导致 CRISM 并不能探测到它们的存在;(3)古湖泊内的沉积物主要由与地球上不同的特殊矿物成分构成。已发现的经历了水的改造作用的矿物包括 Fe/Mg 蒙脱石、高岭石和水合硅石,同时还在耶泽洛撞击坑古湖泊中发现了蒸发盐类(碳酸盐)。目前的研究表明,虽然火星古湖泊中存在一些水改造矿物及蒸发盐类矿物(Ehlmann *et al.*, 2008a, 2008b; Mustard *et al.*, 2008; Dehouck *et al.*, 2010; Ansan *et al.*, 2011),但总体而言,分布较为有限,且这些矿物都为运移而来的物质,而非在原位形成(Ehlmann *et al.*, 2008a, 2008b)。这可能指示了火星古湖泊中有水流入的时间比较短暂,且这些水也以较快的速度流出或消失,导致碳酸盐等蒸发盐类矿物难以在湖泊中形成。而前人对火星古湖泊形貌的研究,也证明了这些湖泊存在的时间较为短暂(Howard *et al.*, 2005; Irwin *et al.*, 2005)。另一方面,上述现象也可能是因为古湖泊中水的化学性质较为特殊,难以在原位形成常见的水改造矿物及蒸发盐类矿物。但这一猜想在目前所获取的数据条件下还难以证明。

2003 年以来,“机遇号”、“勇气号”、“好奇号”等火星巡视探测器的发射,为古湖泊的研究提供了宝贵的原位数据支持。“机遇号”着陆于火星子午线平原

(meridianiplanum),在此处发现了水成沉积层理,探测到了硫酸盐、氯化物等蒸发盐矿物以及富集赤铁矿的“蓝莓”状物质(Christensen *et al.*, 2004; Squyres *et al.*, 2006),并在奋斗撞击坑(Endeavor crater)识别出层状硅酸盐矿物(主要为富铁蒙脱石),证实了探测区域曾经有水存在(Arvidson *et al.*, 2014)。“勇气号”着陆于古瑟夫撞击坑(Gusev crater),该撞击坑被认为是火星上典型的封闭系统古湖泊(Grin and Cabrol, 1997),探测器在撞击坑内的哥伦比亚山(Columbia Hills)发现了硫酸盐、氯化物、赤铁矿和针铁矿,指示了水改造曾在撞击坑内发生。同时,“勇气号”的就位探测结果与 CRISM 在轨探测结果的对比表明,就位探测发现了更多的水改造矿物,指示火星壳物质经历了更为广泛的水的改造(Arvidson *et al.*, 2008; Morris *et al.*, 2008)。“好奇号”着陆点盖尔撞击坑(Gale crater)亦为一封闭系统古湖泊(Cabrol and Grin, 1999)。遥感探测在该撞击坑中发现了层状沉积、赤铁矿、粘土矿物以及蒸发盐矿物(Thomson *et al.*, 2011; Fraerman *et al.*, 2013; Ehlmann and Buz, 2015)。“好奇号”的就位探测发现了与湖泊相关的沉积地貌、湖相泥岩,以及硫酸盐、针铁矿和 Fe/Mg 蒙脱石等矿物,从地貌学、岩石学和矿物学等方面印证了遥感探测的结果(Grotzinger *et al.*, 2014, 2015; Vaniman *et al.*, 2014)。

1.4 古湖泊的年龄

古湖泊的年代学研究对于了解火星水环境的演化具有非常重要的意义。Cabrol and Grin (1999, 2001)利用地层学方法及撞击坑统计法(赵健楠等, 2013)得到了火星古湖泊的大致年龄范围,他们对撞击坑古湖泊的地层分析表明,大部分撞击坑形成于中诺亚纪至晚诺亚纪(约 3.9~3.7 Ga),即为古湖泊的年龄上限。而通过对古湖泊沉积物上新形成的撞击坑进行统计,得到大部分古湖泊最后一次经历改造事件(如火山作用、冰川作用的改造)的时间为西方纪至早亚马逊纪(约 3.7~1.4 Ga)。但是,受高分辨率影像数据及定年方法的限制,他们所获得的结果并不精确。

Fassett and Head (2008a)利用“火星快车”高分辨率立体相机(high resolution stereo color imager, HRSC)及“火星奥德赛号”热辐射成像系统获得的较高分辨率的影像数据,采用缓冲区撞击坑统计法对与火星古湖泊相连的河谷年龄进行了研究(图 4),得到火星高地区域的河谷平均年龄为 3.53 Ga(根据 Hartmann 定年方法)或 3.75 Ga(根据 Neukum 定年方法),表明其属于诺亚纪—西方纪交界

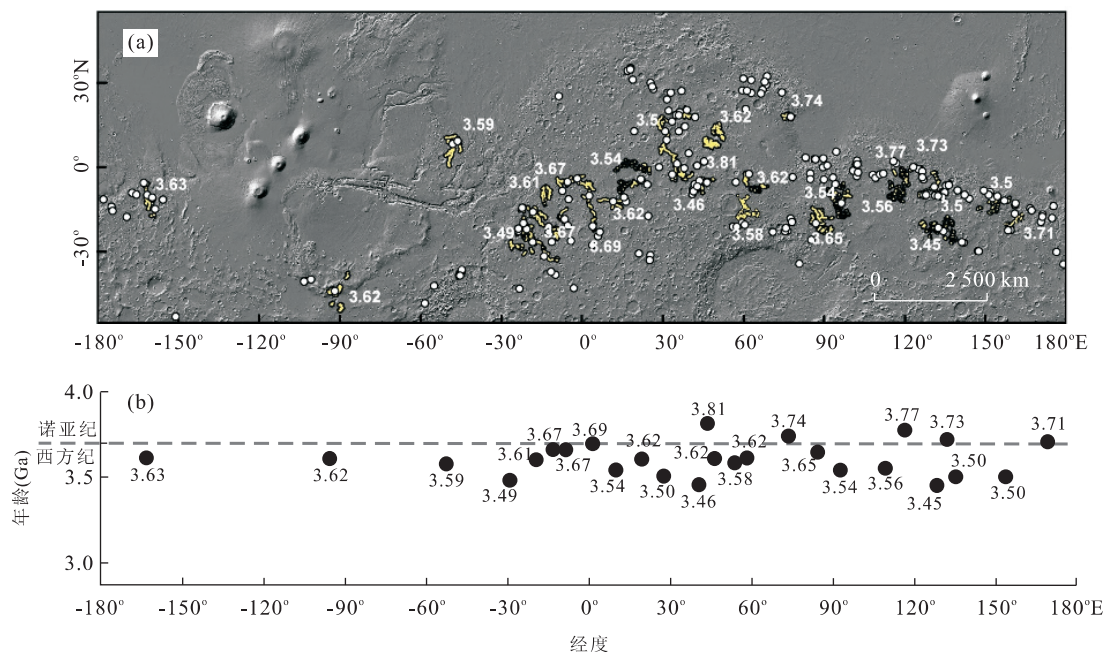


图 4 古湖泊的模式年龄图(a)及年龄分布(b)

Fig.4 Model ages (Ga)(a) and age distribution (b) of some paleolakes

图 a 据 Fassett and Head(2008b),模式年龄单位为 Ga,图中白点指示古湖泊,黄色区域指示开展了撞击坑统计的河谷系统

时期,因而判定火星古湖泊的活动时代也应该处在这一时期.

此外,通过对古湖泊的湖盆底部进行撞击坑统计,Fassett and Head(2008b)也得到部分古湖泊经历后期改造和表面重塑作用的时间,这一时间的跨度为从西方纪一直到早/中亚马逊纪交界附近,该结果与 Cabrol and Grin(2001)所获得的结果较为一致.Goudge *et al.*(2012b)对经历了火山作用改造的 30 个古湖泊进行了撞击坑统计定年,发现它们经历改造的时间为从诺亚纪—西方纪交界一直到早亚马逊纪,但大部分古湖泊被改造的时间为西方纪,这也是大规模火山平原形成的时期(Scott and Tanaka, 1986; Greeley and Guest, 1987; Head *et al.*, 2002).

1.5 古湖泊的全球分布

目前,全球共识识别出 205 个可能的封闭系统古湖泊及 226 个开放系统古湖泊(图 1).通过分析其分布情况可以发现,约 70%的古湖泊分布于南北纬 30°之间,同时,古湖泊的分布也与不同地表单元的地质条件具有很大相关性.例如,大多数古湖泊分布于火星南部高原区,且尤以二分性边界附近更为集中.这可能是因为南部高原区保存了大量的古老撞击坑,它们为水的贮存提供了条件,而在二分性边界附近,发育有大量外流河道,由南部高原流向北部地势较低的平原,这些外流河道为古湖泊提供了水源

(Cabrol and Grin, 1999).此外,205 个封闭系统古湖泊中,约 85%(175 个)具有较短的流入河谷,只有约 15%具有较长的流入河谷.具有较长与较短流入河谷的古湖泊具有大致相同的分布区域,并且也与开放系统古湖泊的分布区域大致吻合.但也有特殊情况存在,如在阿拉伯高地(Arabia Terra)和赞西高地(Xanthe Terra),具有较短流入河谷的古湖泊明显较其他类型的古湖泊更为集中,Goudge *et al.*(2015)认为这可能与该区域曾经具有较强烈的地下水活动有关,而区域内的古湖泊也多以地下水为供给水源,一般具有较短的流入河谷.

1.6 古湖泊对火星气候环境的指示意义

古湖泊的年龄、形貌参数、分布特点等都可在一定程度上反映古湖泊活动时火星的古气候环境.对火星古湖泊活动年龄的研究表明,这些古湖泊的活动时间多为诺亚纪—西方纪交界(Fassett and Head, 2008b; Goudge *et al.*, 2012a),同时,由于火星自诺亚纪以来经历了复杂的地质过程,使得大量古湖泊消失,因而诺亚纪时期的火星高原区域必定广泛存在着大量湖泊.此外,结合层状硅酸盐的发现及大量河谷的分布,都说明诺亚纪晚期应处于较为温暖的气候条件.进入西方纪,大多数湖泊停止活动,说明气候开始变得干冷,地表水减少.

古湖泊的流域面积/湖泊面积(A_w/A)比值可

以反映古湖泊分布区域的局部气候特征。Fassett and Head(2008b)对火星古湖泊及古湖泊链系统的 A_w/A 比值的研究发现:(1)由于在气候较为湿润的区域,蒸发量较小,较小的流域面积即可保证湖泊的形成和稳定存在,所以 A_w/A 比值较小,位于 40°W 至 80°E 之间的 22 个古湖泊的 A_w/A 比值多在 15 左右,而在此范围之外的 38 个古湖泊的 A_w/A 多在 48 左右。这一结果反映了在该经度范围内的区域具有相对较“湿”的局部气候特征,这也与大型湖泊链系统的分布区域相一致;(2)在东半球 70°E 至 150°E 之间,从南向北(直到火星二分性边界附近)古湖泊的 A_w/A 比值逐渐减小。例如,这一区域内位于 30°S 至 15°S 内的 9 个湖泊的 A_w/A 比值约为 39,而位于 15°S 至 0° 内的 18 个湖泊的 A_w/A 比值约为 14。这一现象应该与由南向北火星局部气候特征发生变化有关,北部(即在二分性边界和赤道附近)相对于南部更为湿润。

2 火星古湖泊研究中存在的问题

虽然当前已经对火星古湖泊开展了大量研究,但受高分辨率遥感数据覆盖范围的限制,还只对一部分火星古湖泊进行过详细的研究,而火星古湖泊中的沉积地貌以及沉积物的矿物成分、古湖泊的改造时间及改造机制、古湖泊中水的供给机制等仍然需要更深入的研究。

2.1 古湖泊的沉积地貌及沉积物

火星古湖泊中存在三角洲、冰川沉积、层状沉积等多种沉积地貌类型,目前尚未对这些沉积地貌做过深入研究。例如,对于三角洲地貌,首先,其形成机制尚存疑问。虽然大部分研究认为火星三角洲是水从河谷流入湖泊时沉积形成,但相关证据依然较少,也有可能是重力崩塌、风力的侵蚀及堆积作用、冰川或火山作用中的一种或多种机制共同形成,并非一定需要有湖泊存在(Malin and Edgett, 2003; Leverington and Maxwell, 2004; Moore and Howard, 2005)。其次,形成三角洲沉积所需的时间以及由此指示的古气候和古环境意义也存在争议。目前的研究获得的三角洲沉积系统的形成时间范围从数百年至数千年(Moore *et al.*, 2003; Kleinhans, 2005),而这种时间上的不确定性,使得难以确定三角洲是形成于较稳定的气候环境中,还是形成于暂时的、局域性的事件所导致的气候改变(如火山活动、构造运动及撞击作用导致的气候变化),从而难以可靠地指示

气候及环境的变化(Gulick, 1998; Segura *et al.*, 2002)。此外,考虑到地球与火星的重力不同,并不能完全采用地球上的三角洲地貌研究方法和形成模式理论对火星三角洲进行研究。

对于湖泊沉积物,由于受光谱数据覆盖范围及矿物识别方法的限制,目前只对约 50 个古湖泊的局部区域开展了矿物成分分析,所占的比例小于已识别的古湖泊总数的 15%(Goudge *et al.*, 2012a, 2015),因而不能全面地揭示火星湖泊沉积物的矿物组合特征。同时,由于一些古湖泊受后期改造作用的影响,原始的湖泊沉积物被覆盖或发生较大程度的扰动,也难以对原始湖泊沉积物的矿物特征进行研究。

2.2 古湖泊的改造机制及改造时间

几乎所有的火星古湖泊都经历了不同程度的后期改造作用。然而,目前仅有 117 个古湖泊明确地识别出了其改造机制(Goudge *et al.*, 2012a),而其余古湖泊的后期改造机制尚不清楚,可能与撞击作用、风化作用、构造运动等多种改造机制相关。在古湖泊的改造时间方面,Goudge *et al.*(2012b)对经历了火山作用改造的古湖泊实施了撞击坑统计法定年,获得了火山作用改造的时间。但是,经历了其他改造作用(如冰川作用)的古湖泊的改造年龄尚未被研究,而这对于揭示火星的气候变化历史具有重要的意义。

2.3 其他类型古湖泊的研究情况

目前对古湖泊的研究集中在开放系统古湖泊,即同时具有水流入和流出通道的湖泊。而目前对于封闭系统古湖泊(即只有水的流入通道的古湖泊)的研究较少。一些大型撞击盆地如海拉斯(Hellas)和阿吉尔(Argyre),虽然被认为曾经存在古湖泊(Moore and Wilhelms, 2001; Carr, 2006),但由于其规模巨大,一般未被列入上述古湖泊分类系统,且目前对其相关研究也不充分。同时,由于识别较为困难,对于非撞击坑古湖泊的研究较少。此外,火星表面还存在着其他类型的古湖泊,如火山口古湖泊、构造古湖泊等,对此还没有开展全球性的调查及详细研究。此外,在目前已识别的火星古湖泊中,开展了详细的地貌学、矿物学、地层和年代学研究,并进行了地质填图的古湖泊还较少,仍有多数古湖泊未被详细研究。

2.4 古湖泊中水的供给机制

对于古湖泊水的供给机制,前人已经做过较多研究,并提出了多种涉及降水、地下水、冰川融水等的补给模型(Baker *et al.*, 1991; Baker, 2001; Clifford and Parker, 2001; Mischna *et al.*, 2003; Russell

and Head, 2003; Hanna and Phillips, 2005)。但是,由于不能确定目前观察到的地貌特征及沉积记录在多大程度上代表最原始的沉积记录,因而这些模型也存在不确定性。同时,也难以确定古湖泊活动时火星全球地下水的分布、流动方向、聚集区域,以及火星水循环系统的稳定性。虽然目前主流观点认为火星极区的冰盖融水是全球水补给的重要机制(Clifford, 1993),萨希斯(Tharsis)和艾丽丝米(Elysium)等火山区域形成导致的岩石圈尺度的隆升可能是影响赤道区域地下水流向的重要因素(Baker, 2001; Solomon *et al.*, 2005),但是,由于湖泊系统对于局部气候和环境的影响极为敏感,因此对水的补给机制的研究需要综合考虑不同尺度的多种因素,进行更加深入的分析。

3 总结与展望

古湖泊是火星地质历史的见证者。对火星古湖泊的研究为了解火星地质历史时期的水环境、气候变化以及各种地质过程提供了线索,同时,这也是研究火星宜居性、探索火星过去或现在是否存在生命的窗口。因此,目前和今后的多个火星着陆探测中,备选着陆区都是位于古湖泊中(Golombek *et al.*, 2003, 2012; Pajola *et al.*, 2014),可见其科学探测意义十分重大。

目前,已经在全球范围内对火星表面的古湖泊进行了识别,对古湖泊的形貌特征、沉积地貌及沉积物的矿物成分、古湖泊的活动年龄,以及古湖泊的全球分布特征等进行了研究,并探讨了古湖泊对火星古气候和古环境的指示意义。但是,仍然有大量悬而未决的问题,如古湖泊的改造机制和改造时间、古湖泊水的供给机制等;也有诸多研究不充分之处,如古湖泊的沉积地貌、对单个古湖泊的详细地质调查等,都需要大量后续研究工作。在此,笔者提出以下展望,以便未来对火星古湖泊开展更加深入的研究:

(1)利用最新获得的高分辨率影像和光谱数据对有新数据覆盖的古湖泊开展详细的地质调查,对古湖泊的沉积地貌类型、后期改造特征、矿物成分及年龄等进行详细分析,填制单个古湖泊的大比例尺地质图,并结合其所处的地质背景对邻近区域的地质历史进行综合分析。

(2)拓展火星古湖泊的研究范围,一方面继续尝试寻找新的古湖泊,另一方面对前人研究较少的封闭系统古湖泊以及其他特殊类型的古湖泊(如火山口古

湖泊等)进行识别和研究,获得这些古湖泊的分布特征,并结合前人已获得的开放系统古湖泊的分布情况,绘制出较为完整的火星古湖泊分布图,以便更全面地探讨火星古湖泊的分布规律及其指示意义。

(3)整理火星着陆探测器对古瑟夫、盖尔等撞击坑古湖泊的就位探测成果,并与遥感探测获得的数据进行综合分析,以获得更加深入的认识。

(4)对前人研究较少的冰川、撞击、构造等地质作用对古湖泊的后期改造情况进行研究,分析后期改造地貌、矿物成分以及改造过程发生的时间,以了解古湖泊停止活动后的火星地质演化特点。

(5)采用比较行星地质学的方法(肖龙, 2013),对比研究火星古湖泊和地球干盐湖,分析其沉积地貌、矿物成分等方面的异同,以了解火星古湖泊活动时期的古气候及水环境与地球气候环境的差别,并结合气候模拟与行星大气演化分析结果(Tian *et al.*, 2009, 2010; Hu *et al.*, 2015),进一步探讨火星是否曾经存在适宜生命生存的环境。

References

- Allen, P., Collinson, J., 1986. Lakes. In: Reading, H. G., ed., *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Publishing, Oxford, 63–94.
- Ansan, V., Loizeau, D., Mangold, N., et al., 2011. Stratigraphy, Mineralogy, and Origin of Layered Deposits inside Terby Crater, Mars. *Icarus*, 211(1): 273–304. doi: 10.1016/j.icarus.2010.09.011
- Arvidson, R.E., Ruff, S.W., Morris, R.V., et al., 2008. Spirit Mars Rover Mission to the Columbia Hills, Gusev Crater: Mission Overview and Selected Results from the Cumberland Ridge to Home Plate. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 113(E12): E12S33. doi: 10.1029/2008je003183
- Arvidson, R.E., Squyres, S.W., Bell, J.F., et al., 2014. Ancient Aqueous Environments at Endeavour Crater, Mars. *Science*, 343(6169): 1248097. doi: 10.1126/science.1248097
- Baker, V.R., 2001. Tharsis Superplume (3): Implications on the Role of Water, Environmental Change, and Life. Report 178, GSA Annual Meeting 2001, Boston.
- Baker, V.R., 2006. Geomorphological Evidence for Water on Mars. *Elements*, 2(3): 139–143. doi: 10.2113/gselements.2.3.139
- Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., et al., 1991. Ancient Oceans, Ice Sheets and the Hydrological Cycle on Mars. *Nature*, 352(6336): 589–594. doi: 10.1038/352589a0
- Bibring, J.P., Langevin, Y., Poulet, F., et al., 2004. Perennial Water Ice Identified in the South Polar Cap of Mars. *Nature*,

- 428(6983):627–630. doi:10.1038/nature02461
- Cabrol, N. A., Grin, E. A., 1999. Distribution, Classification, and Ages of Martian Impact Crater Lakes. *Icarus*, 142(1):160–172. doi:10.1006/icar.2000.6530
- Cabrol, N. A., Grin, E. A., 2001. The Evolution of Lacustrine Environments on Mars: Is Mars only Hydrologically Dormant? *Icarus*, 149(2):291–328. doi:10.1006/icar.2000.6530
- Cabrol, N. A., Grin, E. A., 2003. Overview on the Formation of Paleolakes and Ponds on Mars. *Global and Planetary Change*, 35(3–4):199–219. doi:10.1016/s0921–8181(02)00127–3
- Carr, M., 2006. The Surface of Mars. Cambridge University Press, Cambridge.
- Christensen, P., Wyatt, M., Glotch, T., et al., 2004. Mineralogy at Meridiani Planum from the Mini-TES Experiment on the Opportunity Rover. *Science*, 306(5702):1733–1739. doi:10.1126/science.1104909
- Clifford, S. M., 1993. A Model for the Hydrologic and Climatic Behavior of Water on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 98(E6):10973–11016. doi:10.1029/93JE00225
- Clifford, S. M., Parker, T. J., 2001. The Evolution of the Martian Hydrosphere; Implications for the Fate of a Primordial Ocean and the Current State of the Northern Plains. *Icarus*, 154(1):40–79. doi:10.1006/icar.2001.6671
- de Hon, R., 1992. Martian Lake Basins and Lacustrine Plains. *Earth, Moon, and Planets*, 56(2):95–122. doi:10.1007/BF00056352
- Dehouck, E., Mangold, N., Le Mouélic, S., et al., 2010. Ismenius Cavus, Mars: A Deep Paleolake with Phyllosilicate Deposits. *Planetary and Space Science*, 58(6):941–946. doi:10.1016/j.pss.2010.02.005
- Dou, H. S., Wang, S. M., Jiang, J. H., et al., 1996. On the Principles, Scale Division and Procedures of Comprehensive Classification of Chinese Lakes. *Journal of Lake Sciences*, 8(2):173–178 (in Chinese with English abstract).
- Ehlmann, B. L., Buz, J., 2015. Mineralogy and Fluvial History of the Watersheds of Gale, Knobel, and Sharp Craters: A Regional Context for the Mars Science Laboratory Curiosity's Exploration. *Geophysical Research Letters*, 42(2):264–273. doi:10.1002/2014gl062553
- Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Swayze, G., et al., 2008a. Phyllosilicates, Zeolites, and Carbonate near Nili Fossae, Mars: Evidence for Distinct Environments of Aqueous Alteration. *LPI Contributions*, 1441:33–34.
- Ehlmann, B. L., Mustard, J. F., Fassett, C. I., et al., 2008b. Clay Minerals in Delta Deposits and Organic Preservation Potential on Mars. *Nature Geoscience*, 1(6):355–358. doi:10.1038/ngeo207
- Fassett, C. I., Head, J. W., 2008a. The Timing of Martian Valley Network Activity: Constraints from Buffered Crater Counting. *Icarus*, 195(1):61–89. doi:10.1016/j.icarus.2007.12.009
- Fassett, C. I., Head, J. W., 2008b. Valley Network-Fed, Open-Basin Lakes on Mars: Distribution and Implications for Noachian Surface and Subsurface Hydrology. *Icarus*, 198(1):37–56. doi:10.1016/j.icarus.2008.06.016
- Forsythe, R. D., Blackwelder, C. R., 1998. Closed Drainage Crater Basins of the Martian Highlands: Constraints on the Early Martian Hydrologic Cycle. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 103(E13):31421–31431. doi:10.1029/98je01966
- Forsythe, R. D., Zimbelman, J. R., 1995. A Case for Ancient Evaporite Basins on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 100(E3):5553–5563. doi:10.1029/95JE00325
- Fraeman, A. A., Arvidson, R. E., Catalano, J. G., et al., 2013. A Hematite-Bearing Layer in Gale Crater, Mars: Mapping and Implications for Past Aqueous Conditions. *Geology*, 41(10):1103–1106. doi:10.1130/g34613.1
- Glotch, T. D., Bandfield, J. L., Christensen, P. R., et al., 2006. Mineralogy of the Light-Toned Outcrop at Meridiani Planum as Seen by the Miniature Thermal Emission Spectrometer and Implications for Its Formation. *Journal of Geophysical Research*, 111(E12):E12S03. doi:10.1029/2005je002672
- Goldspiel, J. M., Squyres, S. W., 1991. Ancient Aqueous Sedimentation on Mars. *Icarus*, 89(2):392–410. doi:10.1016/0019–1035(91)90186–w
- Golombek, M., Grant, J., Kipp, D., et al., 2012. Selection of the Mars Science Laboratory Landing Site. *Space Science Reviews*, 170(1–4):641–737. doi:10.1007/s11214–012–9916–y
- Golombek, M. P., Grant, J. A., Parker, T. J., et al., 2003. Selection of the Mars Exploration Rover Landing Sites. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E12):13. doi:10.1029/2003je002074
- Goudge, T. A., Aureli, K. L., Head, J. W., et al., 2015. Classification and Analysis of Candidate Impact Crater-Hosted Closed-Basin Lakes on Mars. *Icarus*, 260:346–367. doi:10.1016/j.icarus.2015.07.026
- Goudge, T. A., Head, J. W., Mustard, J. F., et al., 2012a. An Analysis of Open-Basin Lake Deposits on Mars: Evidence for the Nature of Associated Lacustrine Deposits and Post-Lacustrine Modification Processes. *Icarus*, 219(1):211–229. doi:10.1016/j.icarus.2012.02.027
- Goudge, T. A., Mustard, J. F., Head, J. W., et al., 2012b. Constraints on the History of Open-Basin Lakes on Mars

- from the Composition and Timing of Volcanic Resurfacing. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 117 (E12); E00J21. doi:10.1029/2012je004115
- Greeley, R., Guest, J., 1987. Geologic Map of the Eastern Equatorial Region of Mars. US Geological Survey, Reston.
- Grin, E. A., Cabrol, N. A., 1997. Limnologic Analysis of Gusev Crater Paleolake, Mars. *Icarus*, 130 (2): 461—474. doi: 10.1006/icar.1997.5817
- Grotzinger, J. P., Gupta, S., Malin, M. C., et al., 2015. Deposition, Exhumation, and Paleoclimate of an Ancient Lake Deposit, Gale Crater, Mars. *Science*, 350 (6257): aac7575. doi:10.1126/science.aac7575
- Grotzinger, J. P., Sumner, D. Y., Kah, L. C., et al., 2014. A Habitable Fluvio-Lacustrine Environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343 (6169): 1242777. doi:10.1126/science.1242777
- Gulick, V. C., 1998. Magmatic Intrusions and a Hydrothermal Origin for Fluvial Valleys on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planet*, 103 (E8): 19365—19387. doi:10.1029/98JE01321
- Haberle, R. M., Jakosky, B. M., 1990. Sublimation and Transport of Water from the North Residual Polar Cap on Mars. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 95 (B2): 1423—1437. doi:10.1029/JB095iB02p01423
- Hanna, J. C., Phillips, R. J., 2005. Hydrological Modeling of the Martian Crust with Application to the Pressurization of Aquifers. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110 (E1): E01004. doi:10.1029/2004JE002330
- Head, J. W., Kreslavsky, M. A., Pratt, S., 2002. Northern Lowlands of Mars: Evidence for Widespread Volcanic Flooding and Tectonic Deformation in the Hesperian Period. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 107 (E1): 3. doi:10.1029/2000JE001445
- Howard, A. D., Moore, J. M., Irwin, R. P., 2005. An Intense Terminal Epoch of Widespread Fluvial Activity on Early Mars: 1. Valley Network Incision and Associated Deposits. *Journal of Geophysical Research*, 110 (E12): E12S14. doi:10.1029/2005je002459
- Hu, R., Kass, D. M., Ehlmann, B. L., et al., 2015. Tracing the Fate of Carbon and the Atmospheric Evolution of Mars. *Nature Communications*, 6: 1—9. doi:10.1038/ncomms10003
- Irwin, R. P., Howard, A. D., Craddock, R. A., et al., 2005. An Intense Terminal Epoch of Widespread Fluvial Activity on Early Mars: 2. Increased Runoff and Paleolake Development. *Journal of Geophysical Research*, 110 (E12): E12S15. doi:10.1029/2005je002460
- Jiang, J. H., Wang, S. M., 1998. Study on the Classified System of Chinese Lakes. *Advances in Water Science*, 9 (2): 170—175 (in Chinese with English abstract).
- Johnsson, A., Reiss, D., Hauber, E., et al., 2014. Evidence for very Recent Melt-Water and Debris Flow Activity in Gullies in a Young Mid-Latitude Crater on Mars. *Icarus*, 235: 37—54. doi:10.1016/j.icarus.2014.03.005
- Kieffer, H. H., Chase, J. R., Martin, T. Z., et al., 1976. Martian North Pole Summer Temperatures: Dirty Water Ice. *Science*, 194 (4271): 1341—1344. doi:10.1126/science.194.4271.1341
- Kleinhaus, M., 2005. Flow Discharge and Sediment Transport Models for Estimating a Minimum Timescale of Hydrological Activity and Channel and Delta Formation on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110 (E12): E12003. doi:10.1029/2005JE002521
- Leverington, D. W., Maxwell, T. A., 2004. An Igneous Origin for Features of a Candidate Crater-Lake System in Western Memnonia, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109 (E6): E06006. doi:10.1029/2004JE002237
- Li, Z. Z., Wang, D. M., Liu, D. C., et al., 2015. Hyperspectral Remote Sensing Technology and Its Progress in Resources Exploration. *Earth Science*, 40 (8): 1287—1294 (in Chinese with English abstract).
- Malin, M. C., Edgett, K. S., 2000. Evidence for Recent Groundwater Seepage and Surface Runoff on Mars. *Science*, 288 (5475): 2330—2335. doi:10.1126/science.288.5475.2330
- Malin, M. C., Edgett, K. S., 2003. Evidence for Persistent Flow and Aqueous Sedimentation on Early Mars. *Science*, 302 (5652): 1931—1934. doi:10.1126/science.1090544
- Martin-Torres, F. J., Zorzano, M. P., Valentin-Serrano, P., et al., 2015. Transient Liquid Water and Water Activity at Gale Crater on Mars. *Nature Geoscience*, 8: 357—361. doi:10.1038/ngeo2412
- McEwen, A. S., Hansen, C. J., Delamere, W. A., et al., 2007. A Closer Look at Water-Related Geologic Activity on Mars. *Science*, 317 (5845): 1706—1709. doi:10.1126/science.1143987
- McKay, C. P., Davis, W. L., 1991. Duration of Liquid Water Habitats on Early Mars. *Icarus*, 90 (2): 214—221. doi:10.1016/0019-1035(91)90102-Y
- McSween, H. Y., 2006. Water on Mars. *Elements*, 2 (3): 135—137. doi:10.2113/gselements.2.3.135
- Milliken, R. E., Grotzinger, J. P., Thomson, B. J., 2010. Paleoclimate of Mars as Captured by the Stratigraphic Record in Gale Crater. *Geophysical Research Letters*, 37 (4): L04201. doi:10.1029/2009gl041870
- Mischna, M. A., Richardson, M. I., Wilson, R. J., et al., 2003. On the Orbital Forcing of Martian Water and CO₂ Cycles: A General Circulation Model Study with Simplified Volatile Schemes. *Journal of Geophysical Research*:

- Planets*, 108(E6):16. doi:10.1029/2003JE002051
- Moore, J. M., Howard, A. D., 2005. Large Alluvial Fans on Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 110(E4):225–243. doi:10.1029/2004JE002352
- Moore, J. M., Wilhelms, D. E., 2001. Hellas as a Possible Site of Ancient Ice-Covered Lakes on Mars. *Icarus*, 154(2):258–276. doi:10.1006/icar.2001.6736
- Moore, J. M., Howard, A. D., Dietrich, W. E., et al., 2003. Martian Layered Fluvial Deposits: Implications for Noachian Climate Scenarios. *Geophysical Research Letters*, 30(24):PLA 6. doi:10.1029/2003GL019002
- Morris, R. V., Klingelhöfer, G., Schröder, C., et al., 2008. Iron Mineralogy and Aqueous Alteration from Husband Hill through Home Plate at Gusev Crater, Mars: Results from the Mössbauer Instrument on the Spirit Mars Exploration Rover. *Journal of Geophysical Research*, 113(E12):E12S42. doi:10.1029/2008je003201
- Mustard, J. F., Murchie, S. L., Pelkey, S. M., et al., 2008. Hydrated Silicate Minerals on Mars Observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM Instrument. *Nature*, 454(7202):305–309. doi:10.1038/nature07097
- Noe Dobrea, E., Poulet, F., Malin, M., 2006. Omega Analysis of Light-Toned Outcrops in the Chaotic Terrain of the Eastern Valles Marineris Region. *LPI Contributions*, 37:2068.
- Ojha, L., Wilhelm, M. B., Murchie, S. L., et al., 2015. Spectral Evidence for Hydrated Salts in Recurring Slope Lineae on Mars. *Nature Geoscience*, 8(11):829–832. doi:10.1038/ngeo2546
- Pajola, M., Carter, J., Rossato, S., et al., 2014. Eridania Paleolakes Basin Floor: A New Landing Site for the Next Mars 2020 Rover. *LPI Contributions*, 1791:1213.
- Russell, P. S., Head, J. W., 2003. Elysium-Utopia Flows as Mega-Lahars: A Model of Dike Intrusion, Cryosphere Cracking, and Water-Sediment Release. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E6):18. doi:10.1029/2002JE001995
- Sagan, C., Mullen, G., 1972. Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures. *Science*, 177(4043):52–56. doi:10.1126/science.177.4043.52
- Sagan, C., Toon, O. B., Gierasch, P. J., 1973. Climatic Change on Mars. *Science*, 181(4104):1045–1049. doi:10.1126/science.181.4104.1045
- Scott, D. H., Tanaka, K. L., 1986. Geologic Map of the Western Equatorial Region of Mars. US Geological Survey, Reston.
- Segura, T. L., Toon, O. B., Colaprete, A., et al., 2002. Environmental Effects of Large Impacts on Mars. *Science*, 298(5600):1977–1980. doi:10.1126/science.1073586
- Solomon, S. C., Aharonson, O., Aurnou, J. M., et al., 2005. New Perspectives on Ancient Mars. *Science*, 307(5713):1214–1220. doi:10.1126/science.1101812
- Squyres, S. W., Arvidson, R. E., Bollen, D., et al., 2006. Overview of the Opportunity Mars Exploration Rover Mission to Meridiani Planum: Eagle Crater to Purgatory Ripple. *Journal of Geophysical Research*, 111(E12):E12S12. doi:10.1029/2006je002771
- Thomson, B. J., Bridges, N. T., Milliken, R., et al., 2011. Constraints on the Origin and Evolution of the Layered Mound in Gale Crater, Mars Using Mars Reconnaissance Orbiter Data. *Icarus*, 214(2):413–432. doi:10.1016/j.icarus.2011.05.002
- Tian, F., Claire, M. W., Haqq-Misra, J. D., et al., 2010. Photochemical and Climate Consequences of Sulfur Outgassing on Early Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 295(3–4):412–418. doi:10.1016/j.epsl.2010.04.016
- Tian, F., Kasting, J. F., Solomon, S. C., 2009. Thermal Escape of Carbon from the Early Martian Atmosphere. *Geophysical Research Letters*, 36(2):L02205. doi:10.1029/2008gl036513
- Titus, T. N., Kieffer, H. H., Christensen, P. R., 2003. Exposed Water Ice Discovered near the South Pole of Mars. *Science*, 299(5609):1048–1051. doi:10.1126/science.1080497
- Tokano, T., 2005. Water on Mars and Life. Springer, Berlin.
- Toon, O. B., Pollack, J. B., Ward, W., et al., 1980. The Astronomical Theory of Climatic Change on Mars. *Icarus*, 44(3):552–607. doi:10.1016/0019-1035(80)90130-x
- Vaniman, D. T., Bish, D. L., Ming, D. W., et al., 2014. Mineralogy of a Mudstone at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343(6169):1243480. doi:10.1126/science.1243480
- Xiao, L., 2013. Planetary Geology. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zhao, J. N., Huang, J., Xiao, L., et al., 2013. Crater Size-Frequency Distribution Measurements and Age Determination of Sinus Iridum. *Earth Science*, 38(2):351–361 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 窦鸿身, 王苏民, 姜加虎, 等, 1996. 中国湖泊综合分类原则, 级别划分及分类程序之初探. *湖泊科学*, 8(2):173–178.
- 姜加虎, 王苏民, 1998. 中国湖泊分类系统研究. *水科学进展*, 9(2):170–175.
- 李志忠, 汪大明, 刘德长, 等, 2015. 高光谱遥感技术及资源勘查应用进展. *地球科学*, 40(8):1287–1294.
- 肖龙, 2013. 行星地质学. 北京: 地质出版社.
- 赵健楠, 黄俊, 肖龙, 等, 2013. 撞击坑统计定年法及对月球虹湾地区的定年结果. *地球科学*, 38(2):351–361.