

行星盐类研究的重要性

孔维刚, 郑绵平

中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要 人类已在火星、木卫二及土卫二上发现了大量盐类矿物, 木卫三、木卫四也可能有盐类存在, 可见盐类在行星普遍存在。盐类研究对于行星科学具有重要意义。首先, 盐类光谱研究直接帮助研究者对探测数据进行解译, 确定盐类矿物种类, 在探测数据不明确的情况下, 盐类稳定性等还可以帮助限定盐类矿物在探测区域出现的可能性; 其次, 盐类矿物是行星多层圈相互作用的产物, 对行星盐类的研究可以获取行星相关过程中的地质历史信息, 根据所研究盐类起源的不同, 盐类研究有助于理解行星内部的演化、表面水溶液环境、大气成分和结构; 此外, 盐类起源是生命起源的基础, 行星盐类研究是地外生命探索的关键步骤之一。本文综述2008年至今开展的火星盐类类比研究进展。

关键词 类地行星; 盐类; 起源及演化; 地质历史; 类比研究

中图分类号 P691

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.35.001

Importance of Salt Studies in Planetary Science

KONG Weigang, ZHENG Mianping

MLR Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments; Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract Salts were found on Mars, Europa, and Enceladus, and were indicated to exist on Ganymede, Callisto, thus the salts might be common on planetary bodies. Salt studies are, therefore, important for the planetary science. First, the spectroscopic studies of salts serve references for the phase identifications by the analysis of the mission data, and the stability properties of salts can help identify the possible salt phases when the mission data do not give clear indications. Second, salts are the products of interaction between spheres of a planet, thus studies of planetary salts can provide rich information on the geological history of a planet. On the basis of their different origins, salt studies can help understanding the planetary interior, the surface aqueous processes, and the atmosphere. In addition, the origin of salts is the foundation for life occurrence, thus the planetary salt studies are one of the key steps for searching extraterrestrial life. Since 2008, Chinese scientists have carried out analogue studies on Martian salts, thus in this paper, we make a brief review of the analogue studies in the world.

Keywords terrestrial planets; salts; origin and evolution; geological history; analogue studies

20世纪,人类对地球盐类的研究取得了巨量成果。Zheng等^[1]和郑绵平等^[2]在前人研究成果的基础上,基于半个多世纪的盐湖实际研究工作积累,对前人成果进行了高度概括,发展了“盐湖学”这一重要的科学领域。21世纪开始,行星科学领域盐类研究得到越来越多的重视,中国地质科学院盐湖与热水资源研究发展中心则成为国内最早关注这一新领域的团队之一,郑绵平等^[3,4]在基于更高层次对盐科学、盐

体系的探讨中对该领域进行了初步介绍。基于对地球及火星盐类的深入对比分析,Zheng等^[5]进一步对火星盐类研究提出了若干重要的科学问题,为火星盐类研究提供重要思路。

本文除阐述火星盐类研究外,将补充其他类地行星盐类研究的进展。在前人研究的基础上,阐述盐类研究对于行星科学的重要性,并围绕可能对行星盐类研究有意义的方向进行讨论。

收稿日期:2014-09-16;修回日期:2014-11-05

基金项目:国家自然科学基金项目(41303049);中国地质调查局地质调查项目(1212011085517)

作者简介:孔维刚,助理研究员,研究方向为行星盐类矿物学及光谱性质,电子信箱:kwg@cags.ac.cn;郑绵平(通信作者),中国工程院院士,研究方向为盐湖学与盐类地质矿床学,电子信箱:zhengmp2010@126.com

引用格式:孔维刚,郑绵平.行星盐类研究的重要性[J].科技导报,2014,32(35):15-21.

1 行星盐类探测现状

人类对地外行星盐类的认识最早来源于火星,在20世纪初就有科学家认识到火星存在低于零度的天然卤水^[6]。经过21世纪初行星探测的热潮,迄今为止,在火星、木卫二和土卫二上已发现大量盐类矿物^[7-9],木卫三、木卫四也可能存在盐类^[10-13],可见盐类矿物在类地行星上可能普遍存在。

1.1 火星

随着20世纪70年代美国对火星的一系列探测任务的成功,人类对火星的认识发生了质的变化,获得了大量火星地质信息。当时,科学家就已经据火星着陆器所返回土壤化学成分数据推测,火星可能存在多种盐类矿物。在过去的10余年,多个火星轨道及着陆器获得了空前的成功。目前,已在火星表面探测到了碳酸盐、硫酸盐、氯化物等一系列地球常见盐类矿物。通过对大量遥感光谱数据及高分辨率相机数据的综合分析,科学家已经掌握了火星地表各种盐类的大致分布特征:火星靠近北极的高纬度地区分布着大量以石膏为主的硫酸盐^[14];在北半球中低纬度地区水手峡谷及附近洼地分布着广泛的镁、钙硫酸盐^[15];在南半球中低纬度高原地区探测到了分布广泛的氯化物^[16,17]。Zheng等^[5]已对火星蒸发盐探测现状做了详细的综述,这里不再赘述。除了遥感测量外,几个火星车(精神号、勇气号、凤凰号、好奇号)也都在着陆地区发现了一系列蒸发盐矿物。此外,凤凰号在着陆后机械臂上附着的液体中探测到了大气成因的高氯酸盐^[18]。同时,还发现在火星近地表很可能赋存高浓度孔隙卤水^[19]。

1.2 木卫二

木卫二是距离木星较近的卫星之一,半径约为地球的1/4。它是一个典型的冰态行星,具有一个铁-镍的核、硅酸盐

质地幔、和冰质的壳。早在20世纪60、70年代,地基望远镜就已经发现木卫二表层主要由冰覆盖,此后针对木星系统的伽利略号探测飞船确认了这一认识。通过对其冰壳漂移与轨道关系的研究及对伽利略号所测量的木卫二磁场数据分析,科学界已普遍确信木卫二冰壳与硅质幔之间有厚达上百千米的海洋层,理论模拟也已证实,这种冰态行星存在冰下海的现象比较普遍^[20]。

如图1所示,木卫二表面除了光亮的冰面外,还有暗红色沟壑。目前认为这些沟壑是反映冰壳漂移所产生的破裂特征,伽利略号木星探测宇宙飞船上携带的近红外成像光谱仪在这些暗红色区域探测到了大量镁、钠硫酸盐(图2^[8]),很可能有七水硫酸镁、芒硝,而且可能还有钠碳酸盐^[8,21,22]。这些裂隙区域的物质应该是壳底海洋溢出的沉积物,揭示了木卫二壳底海洋很有可能拥有类似地球海洋的卤水。

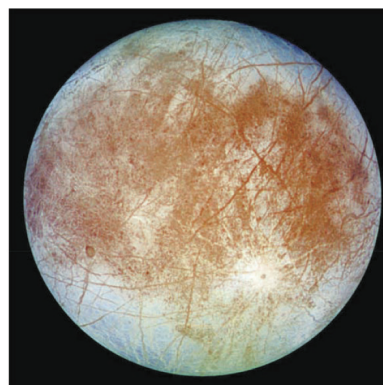


图1 木卫二背面照片(NASA, JPL)
Fig. 1 Photo of Europa (NASA, JPL)

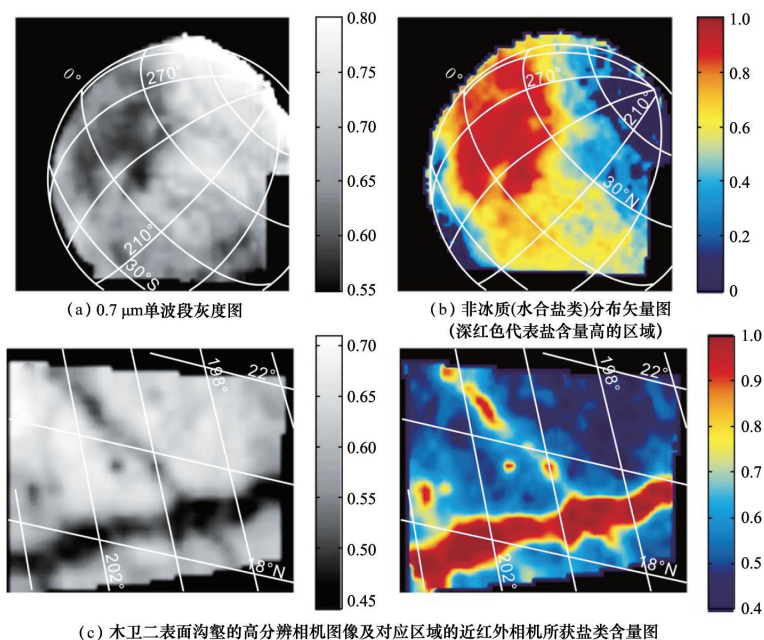


图2 伽利略所携近红外成像光谱仪所探测到的木卫二表面盐类分布

Fig. 2 Distribution of salt rich component on Europa obtained by Galileo's near infrared mapping spectrometer

1.3 土卫二

土卫二(Enceladus)是土星第六大卫星,半径只有地球的4%。土卫二密度约为 1.6 g/cm^3 ,具有冰质外壳及硅铁质的内核。目前对其硅铁质内核是否经历了分异的问题还存在争论^[23]。土卫二存在相对较厚的大气,主要成分是91%水蒸气、4%氮气、3.2%二氧化碳、及1.7%甲烷。

卡西尼-惠更斯号土星及其卫星探测器在土卫二南极地区探测到了冰火山喷发(图3),其所携紫外光谱仪指认喷发物主要为水蒸气,揭示了冰壳覆盖下的海洋。由于土卫二轨道位于土星E环内,动力学模拟表明E环并不稳定,目前普遍认为土卫二冰火山喷发物是维持E环存在的主要物源^[24,25]。质谱仪及微尘探测器在临近土卫二时对E环中的微尘及气体做了分析。分析结果揭示了微尘中含有数量不等的钠盐和钾盐(可能是氯化物、碳酸盐或重碳酸盐),这些盐类应该来源于土卫二的冰火山喷发^[9,26]。其中钾钠比相对较低,反映低温水岩风化过程。土卫二冰火山喷发物中含盐量较高且密度大的颗粒倾向于落回其表面,反之则倾向于逃逸并补充到土星E环中^[27]。

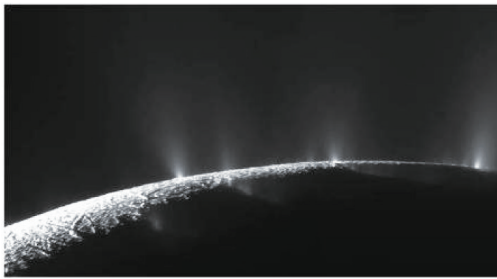


图3 卡西尼-惠更斯号拍摄的卫二南极表面物质喷射
(NASA, JPL, SSI)

Fig. 3 Photo of water vapor plumes captured by Cassini-Huygens spacecraft during the fly-by (NASA, JPL, SSI)

2 盐类研究对于行星科学的意义

2.1 盐类研究对于行星探测的促进作用

过去数十年中,盐类基础研究为行星探测提供了大量基础数据,其作用主要包括直接为探测器科学载荷提供对比参考数据或是在探测数据不能给出明确结果的情况下通过盐类基础物理化学性质,对探测结果进行评估及约束。

首先,行星探测器上相关科学载荷在实验室及野外所采集的盐类矿物样品数据是行星探测数据应用的基础。特别是,盐类矿物的晶体结构通常较有序,其光谱特征明显,探测遥感光谱和盐类实验室光谱往往有高度的吻合(图4^[28])。例如火星遥感探测几个至关重要的发现,实验室盐类光谱数据库都提供了关键的帮助^[29-31]。此外,实验室盐类光谱研究对于理解行星登陆车的采集数据也有很大帮助^[32]。

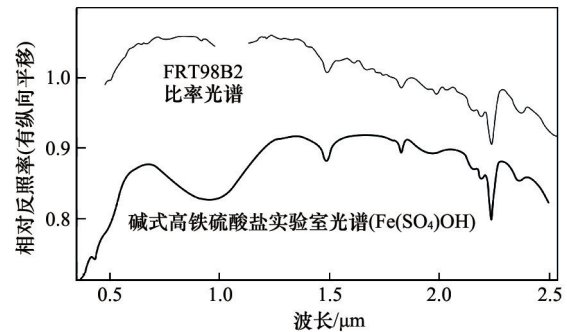


图4 实验室光谱与火星遥感光谱的类比

Fig. 4 Comparison between the laboratory spectrum and the remote sensed spectrum from the orbit

因为行星探测实际条件复杂,地球行星类别点光谱研究也对行星探测具有重要作用^[33],盐湖中心团队自2008年起在青海大浪滩火星类比点开展了相关的研究,并取得较好的国际影响^[34]。

除直接用于行星探测数据解译,盐类基础研究还有助于探测结果的约束。例如,对硫酸盐湿度相图的研究极大的帮助了火星硫酸盐的精细探测^[35-37];水合盐类的稳定性质对约束木卫二表面盐类矿物的定相也起到了重要作用^[38]。

2.2 盐类研究所反映的行星地质过程信息

对于地球而言,盐类是各圈层相互作用的产物^[3],这一规律可推广至其他有盐类出现的行星。盐类记录了行星各圈层相互作用过程中的大量信息,这些信息对于研究行星的地质过程,乃至行星的起源及演化都很重要。

根据成因,盐类可粗略分为内生、表生和大气成因盐类3种。内生盐类对3种盐类的研究所反映的行星地质过程有所侧重。内生成盐指与岩浆活动、火山活动或陆块深部俯冲密切相关的火成盐或热水成盐,如硼锂盐类矿床多与深部过程相关^[39]。表生盐类指地表及次地表水岩相互作用产生的蒸发盐类,地球上大规模的盐类沉积绝大多数属于这类成因。大气中颗粒与气体以水蒸气为媒介发生反应(多为光化学反应)产生第3类成因的盐类,智利硝石矿床就是这种成因^[40,41]。

蒸发盐类记录了其沉积时的古环境信息,尤其是研究古气候良好的指标之一^[42,43]。通过对火星蒸发盐的研究已获得许多重要火星古气候信息。黄钾铁矾是一种水生铁硫酸盐,火星黄钾铁矾的发现首次确认火星地质历史上曾经存在水溶液环境^[31]。通过对火星不同年龄地区盐类分布的规律,对火星地质历史不同时代的水溶液环境进行了初步的划分,发现火星由早期沉积碳酸盐、石膏、镁硫酸盐及石盐的中性偏弱碱性的水溶液环境在30亿年左右开始逐渐变为沉积铁硫酸盐等反映的酸性溶液环境^[7,44]。火星广泛分布镁硫酸盐,通过大浪滩火星类比点硫镁矾的类比研究揭示火星地质历史上气温应该普遍较低,这与火星大气模拟结果一致^[45]。冰态

行星所探测到的高水合状态的盐类(七水硫酸镁、芒硝、水合碳酸盐等)则属于典型的冷相矿物^[42],反映沉积环境温度较低,其中水合态的碳酸盐很有可能是冷相矿物泡碱。

大气成因的盐类主要记录了行星大气成分、结构及大气中悬浮颗粒的信息。行星大气成分通常与地质过程密切相关,因此通过对行星大气成因盐类的研究不仅可以获取行星大气的成分信息,还可以间接的获取行星地质演化的信息。火星凤凰号登陆器发现高氯酸盐就属于大气成因的盐类^[46],反映了干燥、强氧化环境下的光化学作用,因火星大气早期倾向于还原性^[47],该矿物被认为火星地质历史后期才有可能出现的产物^[18]。

内生盐类主要反映行星深部的地质过程。由于深部含盐流体对于多种火成-热水型矿床至关重要,地球内生盐类的研究较多^[48-50]。但限于探测技术,人类目前对地外行星内生盐类的了解还较少,相关研究也比较罕见。虽然木卫二、土卫二上的盐类严格意义上应该还属于表生蒸发盐的范畴,但这种冰态星球巨厚冰壳给其覆盖的卤水提供了巨大的压力,因此水盐系统高压下的性质也得到关注^[51],这也给研究冰态行星内部过程提供了重要参考。

虽然目前针对行星内生盐类的研究较少,但内生盐类与行星内部过程密切相关,是研究行星内部演化的重要指标之一。例如,大量探测表面月球不存在盐类,但科学界普遍接受了月球曾经有岩浆洋的观点^[52]。岩浆演化过程不出现盐类矿物表明月球岩浆缺少氢元素,比较干,因此进一步的模拟可以利用月球缺失盐类这一特征约束月球岩浆的化学成分。

2.3 盐类研究对地外生命探测意义

生命起源所需营养元素主要赋存于星体的硅酸盐中,只有通过水岩相互作用将其溶于水体中,才能为生命的起源所利用。郑绵平等^[3]已经总结了成盐元素(图5^[3]),这些成盐元素大部分都是生命产生的必需元素,因此水岩相互作用的另一产物——盐类是生命产生过程的必然产物。

IA	IIA		VIIB		VIII	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA
H ⁺ 1.0079*						B ⁺	C ⁺	N ⁺	O ⁺	F
Li ⁺ 6.94						10.81	12.011	14.0067	15.999	18.998403
Na ⁺ 22.98977	Mg ⁺ 24.305					Al 26.98154	Si ⁺ 28.085	P 30.97376	S ⁺ 32.06	Cl ⁺ 35.453
K ⁺ 39.098	Ca ⁺ 40.08	Mn 54.9380	Fe 55.84					As 74.9216		Br 79.904
Rb 85.467	Sr ⁺ 87.62									I 126.9045
Cs 132.9053	Ba 137.33									

* 原子量; + 主要成盐元素; △ 次要成盐元素

图5 元素周期表中的成盐元素分布

Fig. 5 Distribution of salt-forming ions in the periodic table

此外,盐类离子在生命产生的有机反应过程中作为组分或者催化剂等,也扮演了重要的角色。例如在原始细胞膜形成后,作为细胞液的主要成分之一,盐类扮演着调节细胞液浓度,以平衡细胞与环境溶液渗透压,促进选择性吸收营养素等重要作用。

盐类产生所需水岩相互作用是生命产生的最基本条件,生命起源必然伴随盐类的出现。并且盐类本身在生命起源的各个阶段也起着关键作用。因此星体出现盐类是生命起源的必要条件,没有盐类的星体不可能有生命的产生。因此,盐类研究对于理解行星生命起源的可能性具有重要意义。

3 行星盐类的研究方法

3.1 研究方法分类

目前行星盐类的研究方法主要有3种:1)在行星探测过程中,通过探测器上的科学载荷,直接对行星表面盐类进行矿物学、沉积学等方面的研究。目前为止,这类探测针对火星比较成功,已在火星探测到多种碳酸盐、硫酸盐、氯化物,Zheng等^[5]对火星盐类探测做了系统综述。2)针对行星探测中遇到的重点盐类开展细致室内模拟研究。研究内容包括盐矿光谱^[32],水岩相互作用及盐流体的起源^[53],盐类的在不同条件下的稳定性质^[37]等。3)在与行星具有类似地质背景、环境特征及矿物组合的地区开展行星盐类类比研究^[45]。类比研究与行星探测和室内基础研究相辅相成,是联系室内基础研究与行星探测的重要纽带(图6)。限于国内研究现状(暂无立项行星盐类探测计划),本文着重介绍行星类比研究。

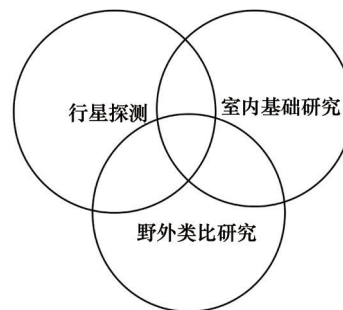


图6 行星盐类研究方法

Fig. 6 Ways to study planetary salts

3.2 类比研究现状

类比研究利用多学科交叉,通过观测类比点地表特征及各种地质过程,加深对其他行星上所观测到的地表形态及地质过程的理解。由于目前只对火星盐类进行了有效的原位探测,这里主要探讨火星类比点。

目前,研究较多的火星类比点有智利阿卡塔玛沙漠实验站、北极斯瓦尔巴群岛火星类比点、南极干谷地区、犹他州火星沙漠实验站、西班牙里奥廷脱火星类比点、突尼斯吉利特

盐湖区类比点及本研究的中国青藏高原大浪滩盐湖火星类比点。

在这些类比点,科学家根据侧重点不同,已经完成了大量的类比研究工作。南极干谷冷干,这里进行的工作涵盖了地质、气象、地理、矿物学、微生物、及光谱学等学科^[54-60]。阿塔卡玛沙漠是世界上最干燥的地区之一,是研究极端微生物、生物标志物、火星相关矿物、及进行探测任务模拟的理想火星类比点^[61-64]。澳大利亚中部有多个热液环境、沙漠、干盐湖、撞击坑等,可与火星类比^[65,66]。北美也有很多可开展矿物学、地理、生物等方面类比研究的火星类比点^[33,67,68]。西班牙的里约廷托有大量采矿酸性废水,是类比研究酸性硫酸盐成因的优良类比点^[69]。Léveillé等^[70]和Preston等^[71]对这些类比点做了详细介绍。

柴达木盆地具有类火星环境及火星类似沉积^[72,73],是研究火星盐类沉积及次生作用的良好类比点。基于大量文献,表1列举了世界上主要火星类比点所开展的类比研究内容。由表1可知,柴达木盆地大浪滩地区可开展几乎所有方面的类比工作,在世界范围内也是难得的火星类比点。

表1 地球上火星类比点研究内容对比

Table 1 Comparison between research aspects of analog sites worldwide

研究内容	南极干谷	阿塔卡玛沙漠	北极	澳大利亚	西伯利亚	挪威	青藏高原大浪滩盐湖
矿物学	√	√	—	√	√	√	√
天体生物学	√	√	√	√	—	√	√
形态学	√	√	√	√	√	√	√
遥感	√	√	—	—	—	—	√
表面风化	√	√	—	√	—	√	√
环境	√	√	—	—	—	—	√
任务模拟及技术测试	√	√	√	√	—	√	√

从2008年开始,中国地质科学院盐湖与热水资源研究中心团队在大浪滩地区从不同角度开展了许多火星类比研究,包括地质、矿物学、天体生物学及遥感等^[34,74-76]。Kong等在柴达木盆地大浪滩地区首次发现六水硫酸镁风化脱水形成硫酸镁矾,旁证了分布广泛的火星硫酸镁矾的次生起源。该发现对理解火星早期气候及水溶液环境具有重要意义。

4 结论

盐类的起源演化与行星地质过程和生命起源密切相关,且盐类在类地行星比较普遍的存在。除可以促进行星探测、揭示行星演化不同阶段的地质过程信息外,盐类研究对于揭

示行星生命起源的基本条件具有重要意义。

根据成因,盐类可分为内生、表生和大气成因3种,对3类盐类的研究可以反映不同圈层在行星各个演化阶段的地质信息。目前行星科学领域已有较多针对表生和大气成因盐类的研究,行星内生盐类的研究还有待加强。

现已有大量针对不同行星的类比研究,极大促进了行星科学的发展。2008年起,中国地质科学院盐湖与热水资源研究中心在柴达木盆地重点盐湖区开展火星盐类类比研究,并已取得初步成果。该区具有得天独厚的类比条件,值得进行更深层次的类比研究工作。

参考文献(References)

- [1] Zheng M P. On salinology[J]. *Hydrobiologia*, 2001, 466(1-3): 339-347.
- [2] 郑绵平. 盐湖学的研究与展望[J]. *地质论评*, 2006, 52(6): 737-746.
Zheng Mianping. Salinology: Research and prospects[J]. *Geological Review*, 2006, 52(6): 737-746.
- [3] 郑绵平. 盐类科学研究的扩展——盐体系研究的思考(代序)[J]. *地质学报*, 2007, 81(12): 1603-1607.
Zheng Mianping. Expansion of Salt Science—Thoughts on saline systems research (in lieu of preface) [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 81(12): 1603-1607.
- [4] 郑绵平. 盐类科学研究的扩展[J]. *科技导报*, 2013, 31(4): 8.
Zheng Mianping. Expansion of salt science[J]. *Science & Technology Review*, 2013, 31(4): 8.
- [5] Zheng M P, Kong W G, Zhang X F, et al. A comparative analysis of evaporate sediments on Earth and Mars: Implications for the climate change on Mars[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(3): 885-897.
- [6] Ley W, Vonbraun W. The exploration of Mars[M]. New York: Viking Press, 1956.
- [7] Bibring J P, Langevin Y, Gendrin A, et al. Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars express observations[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1576-1581.
- [8] McCord T B, Hansen G B, Fanale F P, et al. Salts on Europa's surface detected by Galileo's Near Infrared Mapping Spectrometer [J]. *Science*, 1998, 280(5367): 1242-1245.
- [9] Postberg F, Kempf S, Schmidt J, et al. Sodium salts in E-ring ice grains from an ocean below the surface of Enceladus[J]. *Nature*, 2009, 459(7250): 1098-1101.
- [10] Khurana K K, Kivelson M G, Stevenson D J, et al. Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto[J]. *Nature*, 1998, 395(6704): 777-780.
- [11] Kivelson M G, Khurana K K, Stevenson D J, et al. Europa and Callisto: Induced or intrinsic fields in a periodically varying plasma environment [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, 104(A3): 4609-4625.
- [12] Kivelson M G, Khurana K K, Russell C T, et al. Galileo magnetometer measurements: A stronger case for a subsurface ocean at Europa[J]. *Science*, 2000, 289(5483): 1340-1343.
- [13] Kivelson M G, Khurana K K, and Volwerk M. The permanent and inductive magnetic moments of ganymede[J]. *Icarus*, 2002, 157(2): 507-522.
- [14] Langevin Y, Poulet F, Bibring J P, et al. Sulfates in the north polar region of Mars detected by OMEGA/Mars Express[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1584-1586.

- [15] Gendrin A, Mangold N, Bibring J P, et al. Sulfates in Martian layered terrains: The OMEGA/Mars Express view[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1587–1591.
- [16] Osterloo M M, Hamilton V E, Bandfield J L, et al. Chloride-bearing materials in the southern highlands of Mars[J]. *Science*, 2008, 319(5870): 1651–1654.
- [17] Osterloo M M, Anderson F S, Hamilton V E, et al. Geologic context of proposed chloride-bearing materials on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: E10012.
- [18] Hecht M H, Kounaves S P, Quinn R C, et al. Detection of perchlorate and the soluble chemistry of Martian soil at the Phoenix lander site[J]. *Science*, 2009, 325(5936): 64–67.
- [19] Chevrier V F, and Rivera-Valentin E G. Formation of recurring slope lineae by liquid brines on present-day Mars[J]. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39: L21202.
- [20] Greeley R, Chyba C F, Head III J W, et al. *Geology of Europa[M]*// Bagenal F, Dowling T E, McKinnon W B. *Jupiter: The Planet, Satellites, and Magnetosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 329–363.
- [21] McCord T B, Hansen G B, Matson D L, et al. Hydrated salt minerals on Europa's surface from the Galileo near-infrared mapping spectrometer (NIMS) investigation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, 104(E5): 11827–11851.
- [22] McCord T B, Orlando T M, Teeter G, et al. Thermal and radiation stability of the hydrated salt minerals epsomite, mirabilite, and natron under Europa environmental conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E2): 3311–3319.
- [23] Schubert G, Anderson J D, Travis B J, et al. Enceladus: Present internal structure and differentiation by early and long-term radiogenic heating [J]. *Icarus*, 2007, 188(2): 345–355.
- [24] Kempf S, Beckmann U, Moragas-Klostermeyer G, et al. The E ring in the vicinity of Enceladus: I. Spatial distribution and properties of the ring particles[J]. *Icarus*, 2008, 193(2): 420–437.
- [25] Schmidt J, Brilliantov N, Spahn F, et al. Slow dust in Enceladus' plume from condensation and wall collisions in tiger stripe fractures[J]. *Nature*, 451(7179): 685–688.
- [26] Postberg F, Schmidt J, Hillier J, et al. A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus[J]. *Nature*, 2011, 474(7353): 620–622.
- [27] Kempf S, Beckmann U, Schmidt J. How the Enceladus dust plume feeds Saturn's E ring [J]. *Icarus*, 2006(2): 446–457.
- [28] Lichtenberg K A, Arvidson R E, Morris R V, et al. Stratigraphy of hydrated sulfates in the sedimentary deposits of Aram Chaos, Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115: E00D17.
- [29] Arvidson R E, Poulet F, Bibring J-P, et al. Spectral reflectance and morphologic correlations in Eastern Terra Meridiani, Mars[J]. *Science*, 2005, 307(5715): 1591–1594.
- [30] Ehlmann B L, Mustard J F, Murchie S L, et al. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars [J]. *Science*, 2008, 322(5909): 1828–1832.
- [31] Klingelhöfer G, Morris R V, Bernhardt B, et al. Jarosite and hematite at meridiani planum from opportunity's mössbauer spectrometer[J]. *Science*, 2004, 306(5702): 1740–1745.
- [32] Kong W G, Wang A, Freeman J J, et al. A comprehensive spectroscopic study of synthetic Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg^{2+} and Al^{3+} copiapite by Raman, XRD, LIBS, MIR and vis-NIR [J]. *Journal of Raman Spectroscopy*, 2011, 42(5): 1120–1129.
- [33] Bishop J L, Murad E, Lane M D, et al. Multiple techniques for mineral identification on Mars: A study of hydrothermal rocks as potential analogues for astrobiology sites on Mars[J]. *Icarus*, 2004, 169(2): 311–323.
- [34] Zheng M P, Wang A, Kong F J, et al. Saline lakes on Qinghai-Tibet Plateau and salts on Mars[C]. *Lunar and Planetary Science Conference XL*, Houston, USA: LPI, 2009: 1454.
- [35] Chou I M, Seal R R. Magnesium and calcium sulfate stabilities and the water budget of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2007, 112: E11004.
- [36] Wang A, Freeman J J, Jolliff B L. Phase transition pathways of the hydrates of magnesium sulfate in the temperature range 50°C to 5°C: Implication for sulfates on Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114: E04010.
- [37] Kong W G, Wang A, and Chou I M. Experimental determination of the phase boundary between korinelite and pentahydrated ferric sulfate at 0.1MPa [J]. *Chemical Geology*, 2011, 284(3): 333–338.
- [38] Zolotov M Y, and Shock E L. Composition and stability of salts on the surface of Europa and their oceanic origin[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E12): 32815 – 32827.
- [39] 刘喜方, 郑绵平. 西藏聂尔错镁硼矿地质特征及成矿机制[J]. *地质学报*, 2010, 84(11): 1601–1612.
Liu Xifang, Zheng Mianping. Geological features and metallogenic-mechanism of the Nier Co magnesium borate deposit, Tibet [J]. *ActaGeologicaSinica*, 2010, 84(11):1601–1612.
- [40] Böhlke J K, Erickson G E, Revesz K. Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, U.S.A[J]. *Chemical Geology*, 1997, 136: 135–152.
- [41] Michalski G, Böhlke J K, Thiemens M. Long term atmospheric deposition as the source of nitrate and other salts in the Atacama Desert, Chile: New evidence from mass-independent oxygen isotopic compositions[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68: 4023–4038.
- [42] 郑绵平, 赵元艺, 刘俊英. 第四纪盐湖沉积与古气候[J]. *第四纪研究*, 1998(4): 297–307.
Zheng Mianping, Zhao Yuanyi, Liu Junying. Quaternary saline lake deposition and palaeoclimate[J]. *Quaternary Research*, 1998(4): 297–307.
- [43] Zheng M P, Zhao Y Y, Liu J Y. Paleoclimatic indicators of China's Quaternary Saline Lake sediments and Hydrochemistry[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(2): 259–265.
- [44] Murchie S L, Mustard J F, Ehlmann B L, et al. A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, 114: E00D06.
- [45] Kong W G, Zheng M P, Kong F J, et al. Sulfate-bearing deposits at Dalangtan Playa and their implication for the formation and preservation of Martian salts[J]. *American Mineralogist*, 2014, 99(2/3): 283–290.
- [46] Catling D C, Claire M W, Zahnle K J, et al. Atmospheric origins of perchlorate on Mars and in the Atacama[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115: E00E11.
- [47] Zahnle K, Haberle R M, Catling D C, et al. Photochemical instability of the ancient Martian atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2008, 113: E11004.
- [48] Scambelluri M, Philippot P. Deep fluids in subduction zones[J]. *Lithos*, 2001, 55(1): 213–227.
- [49] Bodnar R J. Fluids in planetary systems[J]. *Elements*, 2005, 1(1): 9–12.
- [50] Kesler S E. Ore-forming fluids [J]. *Elements*, 2005, 1(1): 13–18.

- [51] Valenti P, Bodnar R J, Schmidt C. Experimental determination of H₂O - NaCl liquids to 25 mass% NaCl and 1.4 GPa: Application to the Jovian satellite Europa[J]. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 2012, 92: 117-128.
- [52] Joliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al. *New Views of the Moon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, Vol. 60[M]. Chantilly, Virginia: The Mineralogical Society of America, 2006.
- [53] Tosca N J, McLennan S M, Clark B C, et al. Geochemical modeling of evaporation processes on Mars: Insight from the sedimentary record at Meridiani Planum[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(1): 122-148.
- [54] Bao H, Campbell D A, Bockheim J G, et al. Origins of sulphate in Antarctic dry-valley soils as deduced from anomalous ¹⁷O compositions [J]. *Nature*, 2000, 407(6803): 499-502.
- [55] Bishop J L, Lougear A, Newton J, et al. Mineralogical and geochemical analyses of Antarctic lake sediments: A study of reflectance and Mössbauer spectroscopy and C, N, and S isotopes with applications for remote sensing on Mars[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65 (17): 2875-2897.
- [56] Doran P T, Wharton R A, Des Marais D J, et al. Antarctic paleolake sediments and the search for extinct life on Mars [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1998, 103(E12): 28481-28493.
- [57] Gibson E K, Wentworth S J, and McKay D S. Chemical weathering and diagenesis of a cold desert soil from Wright Valley, Antarctica: An analog of Martian weathering processes[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1983, 88(S2): A912-A928.
- [58] Edwards H G M, Moody C D, Jorge Villar S E. et al. Raman spectroscopic detection of key biomarkers of cyanobacteria and lichen symbiosis in extreme Antarctic habitats: Evaluation for Mars Lander missions [J]. *Icarus*, 2005, 174(2): 560-571.
- [59] Wentworth S J, Gibson E K, Velbel M A, et al. Antarctic Dry Valleys and indigenous weathering in Mars meteorites: Implications for water and life on Mars [J]. *Icarus*, 2005, 174(2): 383-395.
- [60] Marchant D R, and Head III J W. Antarctic dry valleys: Microclimate zonation, variable geomorphic processes, and implications for assessing climate change on Mars [J]. *Icarus*, 2007, 192(1): 187-222.
- [61] Catling D C, Claire M W, Zahnle K J. et al. Atmospheric origins of perchlorate on Mars and in the Atacama[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2010, 115: E00E11.
- [62] McKay C P, Friedmann I, Go' mez-Silva B. et al. Temperature and moisture conditions for life in the extreme arid region of the Atacama Desert: Four years of observation including the El Niño of 1997-1998[J]. *Astrobiology*, 2003, 3(2): 393-406.
- [63] Wierzchos J, Ascaso C, McKay C P. Endolithic cyanobacteria in halite rocks from the hyperarid core of the Atacama Desert. *Astrobiology*, 2006, 6(3): 415-422.
- [64] Quinn R C, Zent A P, Grunthaler F J. et al. Detection and characterization of oxidizing acids in the Atacama Desert using the Mars Oxidation Instrument [J]. *Planetary and Space Science*, 2005, 53(13): 1376-1388.
- [65] Mann G A, Clarke J D A, Gostin V A. Surveying for Mars analogue research sites in the central Australian deserts[J]. *Australian Geographical Studies*, 2004, 42(1): 116-124.
- [66] West M D, Clarke J D A, Thomas M. et al. The geology of Australian Mars analogue sites[J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 447-458.
- [67] Benison K C. A Martian analog in Kansas: Comparing Martian strata with Permian acid saline lake deposits[J]. *Geology*, 2006, 34(5): 385-388.
- [68] Chan M A, Beitler B, Parry W T, et al. A possible terrestrial analogue for haematite concretions on Mars[J]. *Nature*, 2004, 429(6993): 731-734.
- [69] Fernández-Remolar D C, Morris R V, Gruener J E, et al. The Río Tinto Basin, Spain: Mineralogy, sedimentary geobiology, and implications for interpretation of outcrop rocks at Meridiani Planum, Mars [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 240(1): 149-167.
- [70] Lévillé R. A half-century of terrestrial analog studies: From craters on the Moon to searching for life on Mars [J]. *Planetary and Space Science*, 2010, 58(4): 631-638.
- [71] Preston L J, Dartnell L R. Planetary habitability: lessons learned from terrestrial analogues[J]. *International Journal of Astrobiology*, 13(1): 81-98.
- [72] Kong F J, Kong W G, Hu B. et al. Meteorological data, surface temperature and moisture conditions at the Dalangtan Mars analogous site, in Qinghai-Tibet Plateau, China[C]//Lunar and Planetary Science Conference XLIV. Houston: LPI, 2013:1336.
- [73] Kong W G, Zheng M P, Kong F J. Brine Evolution in Qaidam Basin, Northern Tibetan Plateau, and the Formation of Playas as Mars Analogue Site [C]//Lunar and Planetary Science Conference XLV, Houston, USA: LPI, 2014: 1228.
- [74] 孔凡晶, 马妮娜, Wang A, 等. 大浪滩盐湖蒸发盐嗜盐菌培养鉴定及其天体生物学意义[J]. *地质学报*, 84(11): 1661-1667.
Kong Fanjing, Ma Nina, Wang A, et al. Isolation and Identification of Halophiles from Evaporates in Dalangtan Salt Lake[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2007, 84(11): 1661-1667.
- [75] Mayer D P, Arvidson R E, Wang A. et al. Mapping minerals at a potential Mars analog site on the Tibetan plateau[C]//Lunar and Planetary Science Conference XL, Houston: LPI, 2009: 1877.
- [76] Sobron P, Freeman J J, Wang A. Field test of the water-wheel IR (WIR) spectrometer on evaporative salt deposits at Tibetan plateau[C]//Lunar and Planetary Science Conference XL. Houston: LPI, 2009: 2372.

(责任编辑 刘志远)

 科技
导报
SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时需提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。