

行星构造：寻求地球演化的踪迹

肖智勇¹⁾, 许志琴²⁾

1) 行星环境与宜居性研究实验室, 大气科学学院, 中山大学, 广东珠海, 519000;

2) 地球科学与工程学院, 南京大学, 南京, 210023

内容提要:地质构造是记录地球内、外动力地质作用过程的标志。和地球相似, 太阳系其他天体上也发育丰富的地质构造。以研究天体表面的地质构造及其动力学机制为目的的“行星构造学”是建立在构造地质学、遥感地质学和地球物理学等学科基础上的一门新兴前沿学科。由于天体的大小、组分和轨道位置不同, 表面构造特征及其形成机制各异。对比研究地球和其他天体上的构造特征, 是完善地球动力学的重要途径。水星和月球的热演化轨迹大致相同, 内部持续冷却造成全球收缩, 表面形成大量的挤压构造, 而伸展构造仅局部发育。火星的岩石圈主要通过热传导散热, 表面发育大量的挤压构造, 且其形成时间可能呈单峰式分布。同时, 火星表面的伸展和挤压构造和大火山群紧密相关, 表明深部动力过程影响了火星上的区域构造。金星和地球的大小相似, 但金星表面的最大年龄远小于地球大陆地壳的平均年龄, ~80%的早期地质记录完全被后期的岩浆-构造活动抹去, 表面发育大量的火山-深大裂谷系, 说明“幔柱”活动对金星的构造演化至关重要, 因此热传导可能也是当前金星岩石圈的主要散热方式。以上天体的岩石圈形变均以垂直运动为主。在外太阳系, 一些卫星的表壳主要由冰水和其他挥发分组成, 有些卫星存在下伏的液态水圈, 潮汐作用可能是驱动其构造演化的主要动力。在特殊的应力来源和物质特性的共同作用下, 在这些卫星上发育大量的走滑断层和疑似俯冲消减带。行星地质构造从能量和物质属性的角度探究构造运动的物理和化学过程, 与地球动力学研究相辅相成, 对揭示地球早期动力学过程的关键科学问题具有重要的指示意义。

关键词:地质构造; 行星; 月球; 卫星; 岩石圈; 热演化

1959年, 前苏联发射的月球2号探测器在月球表面硬着陆, 标志着人类观测地外天体的分辨率突破了地基望远镜的限制。在此之后的十余年, 美国和前苏联的太空竞赛向内、外太阳系发射了大量的人造航天器, 返回了丰富的天体形貌、成分和地球物理数据, 并从月球表面多个地点获取了原位样品。大量数据和样品的获得, 导致了行星地质学的诞生(与板块学说同时), 并快速发展成为地质学研究的新方向。到目前为止, 人造航天器已访问了绝大部分类型的太阳系天体。特别是, 我国的月球探测和深空探测计划正在实施。目前, 嫦娥探月工程一期和二期任务已取得成功; 嫦娥三期工程即将实现月表采样返回; 首次火星探测已成功发射; 小行星探测计划正立项实施。深空探测计划是人类向宇宙进军的壮举, 也将促进行星地质学的蓬勃发展!

具有固体表壳的太阳系天体包括类地行星及其卫星、矮行星、小行星和彗星; 其中类地行星是指分异形成了硅酸盐壳层的行星, 包括水星、金星、地球和火星。纵观太阳系所有星球的地质特征, 地球具有普通性和特殊性(Greeley, 2013)。例如: ①地球表面绝大部分的地质过程(如火山、流水、冰川、风蚀和构造等)在其他天体上均已发现; ②全球板块活动曾被认为是地球所独有的地质过程, 近年来, 越来越多的证据表明其他天体上可能存在过或正在发生类似的板块活动; ③地球是目前太阳系中唯一存在生命的天体, 且生命的起源和演化与地质过程息息相关, 因而以比较行星学的视角探究生命起源和地质过程的关联, 对研究行星宜居性有重大意义; ④组成地球岩石圈的物质在内、外应力的作用下, 形成不同性质, 且尺度差异高达10个数量级的构造变形。和

注: 本文为中国科学院战略性先导科技专项(XDB 41000000)资助资助的成果。

收稿日期: 2020-08-09; 改回日期: 2020-08-29; 网络发表日期: 2020-10-26; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 肖智勇, 副教授, 博士生导师, 从事行星地质学研究, Email: xiaozhiyong@mail.sysu.edu.cn。许志琴, 教授, 中国科学院院士, 从事构造地质学研究, Email: xzq@nju.edu.cn。

引用本文: 肖智勇, 许志琴. 2021. 行星构造: 寻求地球演化的踪迹. 地质学报, 95(1): 259~275, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2021003.

Xiao Zhiyong, Xu Zhiqin. 2021. Planetary tectonics: indicatorsto earth's evolution. Acta Geologica Sinica, 95(1): 259~275.

地球相似,其他地外天体的固体表面上均发现大量地质构造(Watters et al., 2010)。不同天体、或同一天体的不同区域,由于物质流变性不同和驱动其变形的能量来源各异,使其地质构造呈现和地球的异同性。但是,由于其他天体表面的侵蚀速率极低,古老构造地貌得以保存,行星构造地质学更有利于在广阔的时空尺度上对比和研究天体的热与地质构造演化。

行星构造(planetary tectonics),以天体表面的地质构造为研究对象,与传统构造地质学相辅相成,和地球动力学研究互相启迪,是一门具有重要意义和发展前途的新兴学科。伴随着我国的月球探测和深空探测计划的实施,行星地质学已经逐渐成为我国地质学的前沿方向。在不断涌现的新数据、新技术和新模型的支撑下,在对行星构造的认知过程动态化增进的基础上,为进一步贯通地球动力学和行星地质构造的研究,本文梳理了当前行星地质构造研究的现状,讨论对地球动力演化的指示意义,以期与同仁们一起提升对天体动力学的认识。

1 行星地质构造的基本样式

地质构造是应力加载下物质变形的体现。在不同的应力张量的作用下,物质以压缩、伸展、走滑等基本变形样式及其组合产生应变。虽然具有固体表面的天体在组分和物质力学性质上差异巨大,其构造响应特征服从相同的物理规律。地球上的基本构造样式在太阳系其他类地天体(也即分异形成了硅酸盐壳层的天体,包括月球、类地行星、木卫一和直径超过 100 km 的小行星)表面均有发现,且不同天体上具有在形态上高度相似的地质构造。

1.1 断层

在类地天体表面,逆断层是最常见的断层类型(Watters et al., 2010)。类地天体上的逆断层有 3 种最常见的地貌表现:蜿蜒皱脊(wrinkle ridges)、叶片状悬崖(lobate scarps)、和高岭皱脊(high-relief ridges)。这三种逆断层在地貌上均为线性隆起,走向不稳定,主要的区别体现在隆起处的地形廓线上。蜿蜒皱脊两侧的坡度差异较小,呈整体截然凸起的开阔弧形(图 1a);叶片状悬崖具有明显不对称的两侧坡度(图 1b);高岭皱脊则呈尖棱状的地形突起(图 1b)。类比地球上相似形态的挤压构造(图 1c),模拟断层产状与表面地形的对应关系(图 1d),可发现这三种挤压构造均由低倾角的逆冲断层活动形成(Plescia et al., 1986),地貌上的差异主要由近地表

的次级构造控制(Montési et al., 2003)。其中,叶片状悬崖的表面形貌特征与单斜的断延或断展褶皱相似;蜿蜒皱脊最可能是由逆掩断层和上覆的反冲断层,以及二者之间所夹的褶皱共同形成;高岭皱脊则是主逆冲断层的上盘在靠近地面发育大量高倾角的反冲断层共同形成。沿着单条逆断层,不均一的浅表层结构可能通过控制近地表次级构造的样式,造成以上 3 种地貌类型之间相互转换(图 1b 和 1c)。例如,在具有层状结构(如岩性或结构分层)的浅表层中,逆掩断层更容易发育反冲断层并形成蜿蜒皱脊(Niño et al., 1998; Montési et al., 2003)。

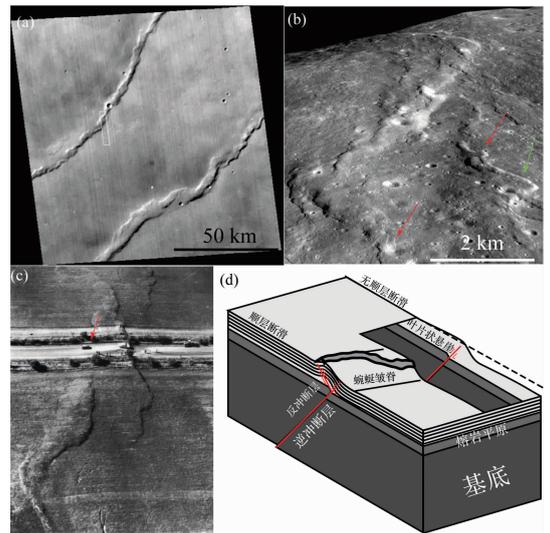


图 1 不同天体表面的逆断层

Fig. 1 Reverse faults and thrust faults on different planetary bodies

(a)—Sinuous ridges on Mars (Montési et al., 2003); (b)—Various shapes of thrust faults on the Moon. The surface morphology along an individual main thrust may change along the strike, as the red arrows point to wrinkle ridges, and the green arrow points to a lobate scarp. The base image was obtained by Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (Robinson et al., 2010); (c)—Small extensional and contractional structures formed during Earthquakes, the red arrow points to a car as scale (Plescia et al., 1986); (d)—Earth analog and numerical simulations reveal the subsurface structures of various shapes of contractional structures on planetary bodies (Montési et al. 2003)

地外天体上的正断层常以地堑或半地堑的组合形式存在(图 2)。在类地天体表面,正断层具有区域分布的特点,很多正断层位于火山区域(图 2a~2c),还有些与大撞击坑或盆地有关(图 2d)。在外太阳系的冰卫星上,由正断层组成的地堑和地垒是常见的地质构造(如图 2e)。

走滑断层在月球和类地行星上很少见。水星表面的一些挤压构造沿走向发生不均匀应变(图 3a),推测在切向上可能存在走滑断层,以调节差异应变(Massironi et al., 2015; Byrne et al., 2018)。月球上可能也存在类似的走滑断层,但尚无直接的观测证据(Watters et al., 2010)。火星(图 3c)和金星(图 3d)表面发育少量的走滑断层(Andrews-Hanna et al., 2008)。在外太阳系的一些冰卫星上,走滑断层较发育,例如木卫二(图 3e;

Kattenhorn, 2004)和土卫二(Patthoff et al., 2011; Yin A, 2016)上均可见滑距达数十 km 的走滑断层。

1.2 褶皱

一些地外天体表面最常见的褶皱是与上述挤压断层共生的褶皱(图 1)。在古老的水圈的作用下,火星表面发育厚层的沉积岩序列,褶皱在层状地层中清晰可见(图 4a)。在水星上,全球收缩形成了波长数百 km、走向延伸上千 km 的长波褶皱(long-wavelength folds)。例如,图 4b 显示了水星卡路里撞击盆地(直径 1550 km)内、外的长波褶皱(Klimczak et al., 2013)。该盆地形成之后,内部被低黏度的溢流型玄武岩快速填充(Murchie et al., 2008),盆地底部应该处于同一重力水准面。但是,在盆地的南侧和北侧,当前分别存在一条近东西向

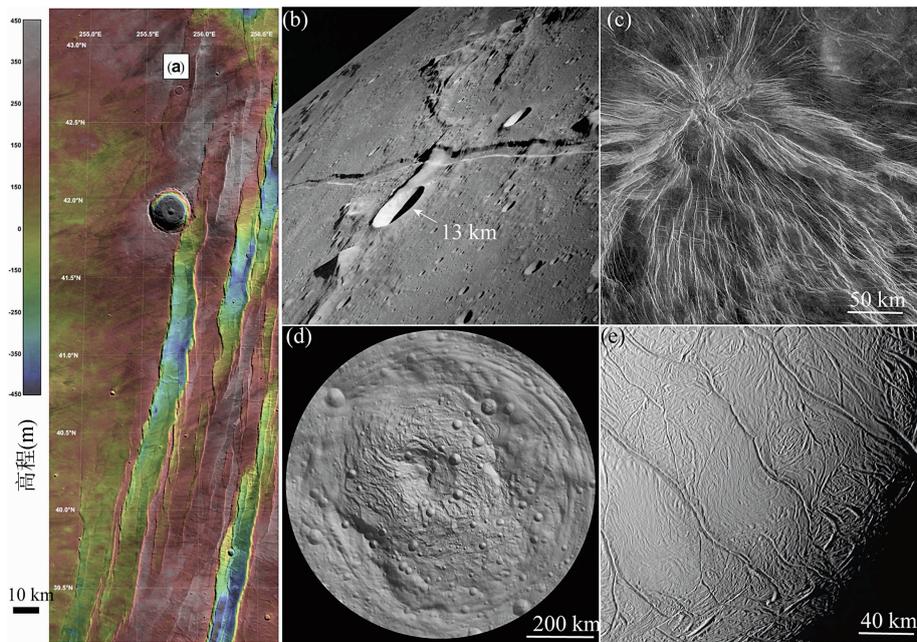


图 2 天体表面的正断层

Fig. 2 Normal faults on planetary bodies

(a)—火星上的地堑系统,可见地堑中部的断距较两端大,两侧的断层由雁列式的次级断层组合形成。引自 Schultz et al. (2010a); (b)—月球上的 Ariadaeus 地堑切割高地和月海,长度超过 300 km,箭头所示的 13 km 直径的撞击坑为比例,数据来源于 Apollo 10; (c)—金星 Magellan 获取的雷达数据显示 Ts'an Nu Mons 火山及其周围放射状的地堑系统; (d)—围绕主带小行星 4Vesta 南极的 Rheasilvia 盆地发育的大型地堑系统。Rheasilvia 撞击盆地的直径~505 km,接近 4Vesta 的直径,图中的正地形是盆地中央的中央隆起,数据来自 Dawn; (e)—土卫二(Saturn)南极的地堑组合,数据来自 Cassini

(a)—Morphology and topography of graben on Mars, which shows larger throw in the center, and the bounding faults exhibit an en echelon pattern (Schultz et al., 2010a); (b)—The Ariadaeus graben on the Moon has cut through both the lunar mare and highland. The length of the graben is over 300 km and the arrow points to an~13 km diameter crater as scale. This image was obtained by Apollo 10; (c)—Radial graben system around the Ts'an Nu Mons on Venus, and the radar image was obtained by the Magellan radar system; (d)—Concentric graben formed by the Rheasilvia basin at the south pole of 4Vesta. The diameter of Rheasilvia is~505 km, which is close to the diameter of 4Vesta. A positive topography is visible in the basin center, which corresponds to the ancient central uplift. This mosaic was obtained by the Dawn mission; (e)—Parallel and en echelon giant graben at the southern hemisphere of Saturn's moon Enceladus, the data was obtained by the Cassini spacecraft

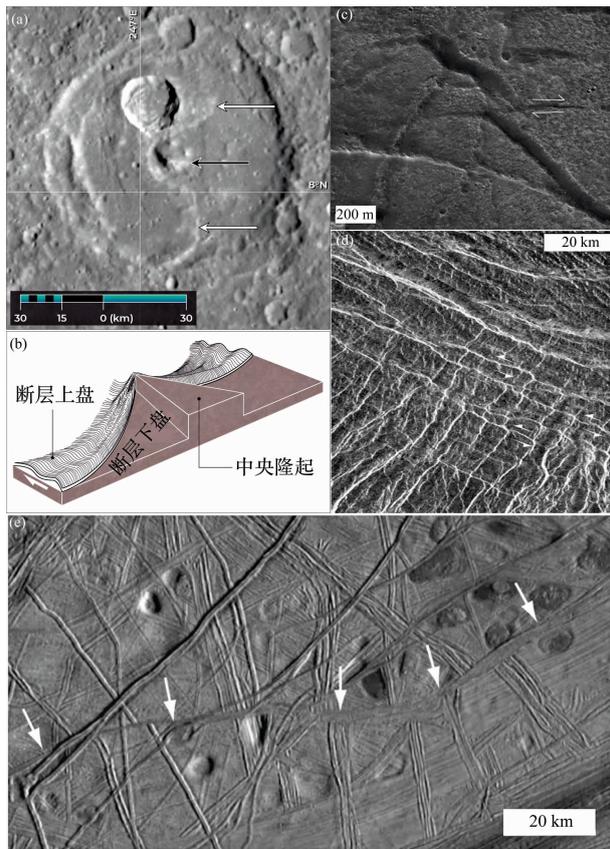


图3 天体表面的走滑断层

Fig. 3 Strike-slip faults on planetary bodies

(a)一水星上的一条叶片状悬崖在推覆方向上被撞击坑内的中央隆起阻挡,走滑断层可能调节了沿走向上的应变差异;构造模式图见(b),引自 Byrne et al. (2018);(c)一火星上的一条小型走滑断层,引自 Massironi et al. (2014);(d)一金星上的一条北西-南东向的走滑断层错断了北东-南西向的蜿蜒皱脊,引自 Massironi et al. (2014);(e)一沿木卫二上的一条线型构造发生了左行走滑,引自 Schultz et al. (2010b)

(a)—A lobate scarp on Mercury exhibits different displacements along the strike, as the central peak of the transected crater has prohibited equal-displacements along the thrust, so that strike-slip faults might exist to accommodate the differential displacements. Panel (b) shows the schematic diagram of subsurface structures in this region. This figure is referred from Byrne et al. (2018); (c)—A small strike-slip fault on Mars, and it is referred from Massironi et al. (2014); (d)—A NWW-SEE trending strike slip fault on Venus has transected a set of NE-SW trending wrinkle ridges. This panel is referred from Massironi et al. (2014); (e)—A strike-slip fault on Europa and this figure is referred from Schultz et al. (2010b)

的地形隆起带,其高度超过了卡路里盆地坑缘的高度,隆起地带与底部凹陷的高程差超过 4 km (图 4b)。在地形隆起带上,复杂撞击坑的坑底均顺坡倾斜,这与复杂撞击坑形成之初具有水平的底部相矛盾,表明隆起带是在后期压应力作用下形成的褶

皱。模拟此类长波褶皱的地形和应变的耦合关系表明变形发生在整个水星岩石圈内(Klimczak et al., 2013)。同时,在水星其他区域,如卡路里盆地的西侧(图 4b)也存在类似的长波褶皱(Byrne et al., 2018)。在月球上尚未发现此类褶皱。外太阳系的冰卫星上也发育一些褶皱,但其数量很少,且一般需要特殊的图像处理才能被识别(Prockter et al., 2000;图 4c)。

1.3 节理

节理是破裂面两侧没有发生明显侧向或垂向位移的裂隙,在地球和其他天体表面均普遍发育。在地球上,喷出地表的岩浆和高速撞击产生的熔融物在快速冷凝的过程中发生体积收缩,形成冷凝节理。此类节理在地外天体表面的基性熔岩流和撞击熔融席中均有发现(图 5)。柱状节理是冷凝节理的代表性构造(Grossenbacher et al., 1995),在地表喷出岩和浅层侵入岩中较常见。利用亚米像素级的影像数据,最近在火星玄武岩层中也发现了柱状节理(图 5a;Milazzo et al., 2009);但是在相同分辨率的月球影像数据中并未发现类似的现象(图 5b;Xiao et al., 2014)。热力学计算发现,形成柱状节理需要较高的冷凝速率,水或其他挥发分在冷凝裂隙中的热对流是必要的成因要素(Xiao et al., 2014)。相比之下,无大气天体的表面熔岩流和地球深海喷出岩(Toramaru et al., 2004)的冷凝速率较小,因此不发育柱状节理。在火星玄武岩中发现柱状节理,说明在同时期的火星表面存在活跃的水圈(Milazzo et al., 2009)。彗星主要由高孔隙度的水冰和少量粉尘组成,在彗星快速靠近和远离太阳时,自转造成表面温度快速变化,也会形成大量的节理(Höfner et al., 2017)。

2 行星地质构造的基本研究方法

与传统构造地质学的研究方法相似,行星构造以几何学和运动学的观测为基础,研究其动力过程。相比地球构造丰富的研究方法,对地外天体上的地质构造开展实地考察的机会很少,主要的研究数据来源于遥感观测。月球和深空探测计划已返回海量的影像、地形、反照率光谱、重力、磁场、热物理和雷达等数据。虽然越来越多的天体拥有亚米级像素的影像和地形数据,但遥感观测的视角无法与地球实地考察比拟。有限的观测手段制约了行星构造研究的精细程度。

在地外天体上,表面相似的地貌特征通常有多

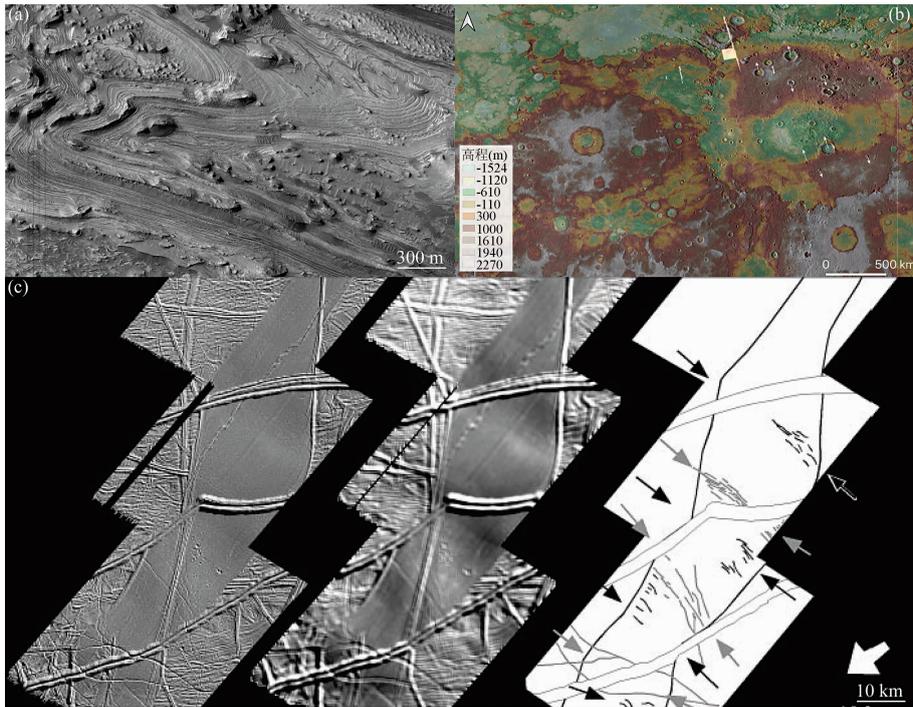


图 4 天体表面的褶皱

Fig. 4 Folds on planetary bodies

(a)—火星沉积岩上的背形褶皱与地球上的高度类似,基于高分辨率地形模型测量的产状分布,表明该区域的褶皱枢纽倾斜,走向近北西-南东东向,倾伏向朝西。引自 Schultz et al., 2010a; (b)—水星卡路里盆地的内平原和外平原上的岩石圈长波褶皱,图中的白色箭头指示复杂撞击坑坑底的地形倾向均背离褶皱的枢纽,引自 MESSENGER; (c) —木卫二上的褶皱,左图和右图分别是原始图像和经过数字处理后的图像,褶皱仅在纹理增强后的图像中显示。沿褶皱枢纽还可见大量的平行的张性构造,引自 Prockter et al., 2000

(a)—Folds formed in Mars sedimentary rocks are akin to those on Earth. Analyses of attitudes of the deformed strata, which can be measured based on high-resolution topography data reveal that the fold hinge is trending NWW-SEE, and it is inclined toward the west. This image is referred from Schultz et al., 2010a; (b)—Long-wavelength folds developed in both the Caloris interior and exterior plains. The white arrows in this figure show that crater floors are tilted away from the hinges of the anticlines. The data were obtained by the MESSENGER spacecraft; (c)—Folds on Europa. The left and right images are the original and processed images for a same region, where folds can be only obtained in the sharpened image. Along the fold hinges, parallel openings are visible. This image is referred from Prockter et al., 2000

种可能的成因。例如 20 世纪 60 年代以前,大部分地球和月球表面的撞击坑被认为是火山口 (Melosh, 1989); 地形退化后的古老熔岩流可能与线性构造难以区分。因此,识别地外天体表面的地质构造需结合地形交切关系和区域地质背景。影像和地形数据是识别地外地质构造、研究其表面几何形态和运动特征的基本数据。以水星为例,图 6a 显示一条走向长近千 km 的线性形迹错断了大量撞击坑,导致其直径缩短。由此可判断这条线性构造属于挤压断层,沿走向的地形隆起对应着断层活动形成的褶皱。

大部分天体表面的侵蚀速率极低,例如火星表面当前的年平均侵蚀率仅 1nm (Golombek et al., 2000)。因而,大部分行星构造无需使用平衡剖面恢复其初始形态,表面地形即近似代表形成之初的几何形态。基于假设的构造产状,根据三角几何关系

可推测相应的应变 (Schultz et al., 2010b)。在行星地质研究中,地质构造的产状缺乏实测数据。根据理想的安德森断裂模型 (Anderson, 1942),天体表面的正断层和逆冲推覆断层的倾角一般假设是 60° 和 30° (Jaeger et al., 2007)。利用表面地形作为制约,在假设一定的岩石力学性质时,使用有限元弹性位错模型,可估算地外地质构造的倾角范围。例如,对火星平坦平原上的挤压构造的研究发现其下伏断层的产状约为 $20^\circ \sim 40^\circ$ (Schultz et al., 2001)。此类模拟和观测对比,还可反演断层的产状随深度的可能变化。例如,水星、月球、和火星表面的玄武岩平原上的挤压构造,其走向长度和高度小于相对较老的地质单元上的相似构造,模拟表明此类逆冲断层是深度较浅的薄皮构造,断层向下可能发展为顺层滑脱 (图 6c),滑脱面可能对应着不同的岩性或结构界面 (Jerram et al., 2005; Byrne et al.,

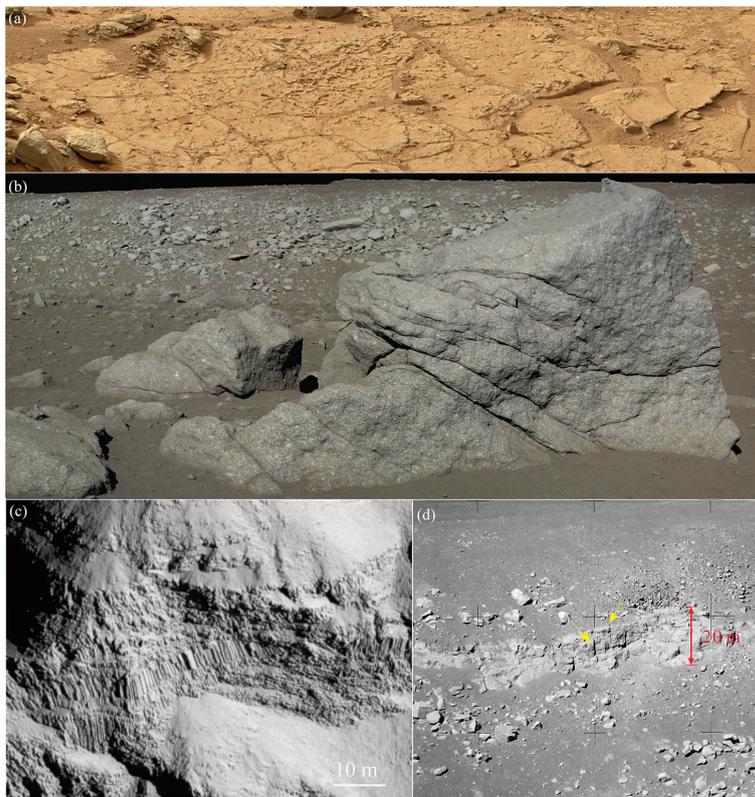


图5 天体表面的节理

Fig. 5 Joints on planetary bodies

(a)—火星好奇号巡视路线上的节理被后期脉岩填充。数据引自 NASA Curiosity Mast Camera (图副宽约 4 m); (b)—月球表面石块中发育的节理(Xiao, 2014)。数据来自嫦娥三号玉兔月球车(图副宽约 4 m); (c)—火星上的柱状节理与地球上的高度相似, 指示了表面熔岩流与水圈的交互作用, 引自 Milazzo et al. (2012); (d)—月球玄武岩流中存在冷凝节理(黄色箭头), 但不发育规则形态的柱状节理, 引自 Xiao et al. (2014)

2018)。

断层群 (fault population) 的位移-长度尺度率 (displacement-length scaling relations) 是了解断层活动性质, 推测其发育层位和动力学特征的重要数据 (Marrett et al., 1991; Walsh et al., 1991; Scholz et al., 1993)。对断层生长的过程研究表明, 顺断层的走向中部的位移最大, 两端最小 (Cowie et al., 1992a); 断层越长, 最大断距越大 (Watterson, 1986; Walsh et al., 1988; Clark et al., 1996)。同一断层群内, 单条断层的长度 (L) 及其沿走向的最大位移 (D_{\max}) 可用幂律分布表示, $D_{\max} = \gamma * L^c$ 。其中系数 γ 与围岩的强度、剪切模量、断层面的形态和应力环境有关, 一般在 0.001 到 1 之间 (Cowie et al., 1992b; Schultz et al., 2006; Schultz et al., 2002); 幂指数 c 与断层面的形态演

化有关。该关系式适用于所有天体、长度差异达 8 个数量级的正断层、逆断层和走滑断层群 (Cowie et al., 1992a)。一个断层群的 $c=1$ 意味着不同长度的断层沿走向的位错分布相似, 称为自相似的断层群。一般的断层群的 $c < 0$, 在 -0.5 和 -2 之间 (Marrett et al., 1991; Walsh et al., 1991; Scholz et al., 1993)。这意味着断层长度增加, 位移不会一直成比例的增加, 因此断层群在形成过程中, 应变主要由较大的断层协调, 而较小的断层所累积的应变相对较小。造成 $c < 0$ 的可能原因是断层在生长过程中相互连接 (Schultz et al., 2010b), 或断层被限制在某一个深度内 (Schultz et al., 2002), 具体情况需结合实际的岩石类型、断层的空间分布方式和可能的动力机理分析。

年龄是研究地质构造的演化和动力学机理的关

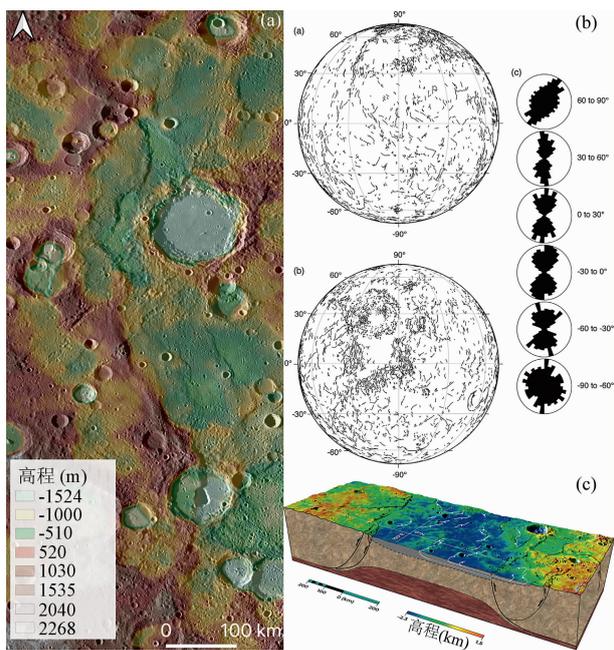


图 6 水星地质构造的几何学、运动学和动力学分析

Fig. 6 The geometric, kinematic, and dynamic analyses for contractional structures on Mercury

(a)—水星表面的一组近南北向巨型逆冲断层-褶皱带,底图为叠加的地形和影响数据,数据来源于 NASA MESSENGER;(b)—水星全球挤压构造的空间分布及其在不同纬度带的走向统计(Klimczak et al., 2015);(c)—推测的水星表面地质构造的地下结构,有些可能深达岩石圈底部,有些可能限制在脆性岩石圈上部(Byrne et al., 2018)

(a)—A set of north-south trending giant thrust faults and their related folds on Mercury. The base morphology and topography data were obtained by the MESSENGER mission;(b)—Global distribution of contractional structures on Mercury and statistics on their strikes within different latitude zones. This figure is referred from Klimczak et al. (2015);(c)—Suspected subsurface structures of contractional structures on Mercury, some thrust faults may have extended beyond the crust thickness, reaching the upper mantle. Smaller faults are restricted within the brittle lithosphere (Byrne et al., 2018)

键信息。在类地天体中,仅从月球上获取了原位的样品。撞击坑是太阳系固态天体表面最常见的地貌单元。撞击坑的形态随直径变化,从小到大可以分为简单坑、复杂坑和撞击盆地。撞击坑是天体表面的“化石”,其形貌和坑群分布特征反映了表面地质单元的年龄信息。地外天体的地层框架主要建立在地质单元的交切和叠覆的关系之上,也即地层叠覆率。由于单个撞击坑可在全球范围内形成溅射物,建立地层时代的主要控制点是代表性的撞击构造,例如大型撞击盆地和具有新鲜溅射纹的撞击坑。撞击坑统计是行星地质研究中最常用的相对和绝对定

年方法(Neukum, 1983)。该方法体系由两个部分构成:撞击坑形成时的大小-频率分布,也即撞击坑产生方程;某一直径的撞击坑的产生频率,也即撞击坑年代方程。建立这两个方程的基础是 Apollo 和 Luna 计划返回的月球样品以及对应地层单元上撞击坑的大小-频率分布(Neukum et al., 2001)。在实际研究中,通过统计对应地质单元(如地质构造)上撞击坑的大小-频率分布,拟合撞击坑产生方程和年代学方程,即可估算相应单元的绝对模式年龄(肖智勇等,2013)。通过对比月球和太阳系其他天体表面的撞击频率,月球撞击坑产生方程和年代方程也被转换至其他天体上(Hartmann et al., 2001; Strom et al., 1988)。大量的地球和地外研究已验证了这套方法的一阶可靠性,撞击坑统计是研究天体表面地质演化得时间线的主要工具。

地质构造的形成时间及其所处的地质背景是判定其动力机制的重要依据。对于给定的地质构造,其形成时间、应变量和空间分布方式是指示其构造应力场、解释其动力来源的观测基础。结合岩石圈强度模型,数值模拟是验证动力机制解释的重要方法。以水星为例,全球分布的挤压构造(图 6b)及其地层交切关系和绝对模式年龄限定了应力场的演化方式,数值模拟发现幔部对流不是造成岩石圈收缩的主要原因,早期的潮汐减速和内部持续冷凝造成的全球收缩是主要的应力来源(Klimczak et al., 2015)。

3 典型天体的构造演化史

每个天体各自的构造演化具有一定的特殊性。本文将简介月球、金星、火星和木卫二的构造演化史。更详细的介绍以及其他天体的构造演化史可参考 Watters et al. (2010)。

3.1 月球构造演化简史

月球表面最古老的地形记录是早期岩浆洋分异后形成的斜长岩高地,年龄在 44 亿年左右。月球早期的内部生热效率大于整体的释热效率,发生体积膨胀(Solomon et al., 1976)。最近,在月球重力场数据中发现了走向长超过千米、宽数十千米、深近百千米、且缺乏地形表征的线性构造(Andrews-Hanna et al. 2013)。地层交切关系表明这些线性构造是月球上最古老的地质构造,重力场解译认为这些线性构造对应着月球早期膨胀阶段形成的大型地堑和侵入岩墙(Andrews-Hanna et al. 2013)。

地形上可见的最古老的月球地质构造与撞击盆

地有关。撞击形成的环形正断层走向延伸上万 km,地形和弹性位错模型联合计算发现其深度可超过 30 km,例如月球上最显著的撞击盆地:东海盆地(Nahm et al., 2013)。月表已发现的最古老的玄武岩形成在~42 亿年前,更早的玄武岩可能也存在(Taylor et al. 1983);38~32 亿年前后的大规模火山喷发形成了月球正面的主要月海(Hiesinger et al., 2011),其喷发量和喷发速率符合地球上大火成岩省的定义。玄武岩平原对下伏的斜长岩月壳产生重力加载,形成了月表最常见的挤压和伸展构造,长数百千米,深/高数百米(Solomon et al., 1980)。同时,在月球高地上也存在大量相似尺寸的叶片状悬崖。挤压构造的空间分布和地层交切关系表明月球的全球收缩发生在~38 亿年前,而与月海盆地的重力沉降有关的伸展构造在~36 亿年后即不再发育(Solomon et al., 1980)。这表明自~36 亿年前,月球全球的岩石圈进入净压缩阶段。值得一提的是,与月海玄武岩重力沉降相关的正断层的深度一般仅数千米,部分地堑可能是在下伏岩墙的顶侵作用下形成的,岩墙顶部位于脆性岩石圈的底部,深约 15~20 km (Klimczak, 2014)。根据挤压构造的年龄和应变观测,计算发现月球内部冷凝造成的半径缩短量小于 1 km (Golombek et al., 1983; Watters et al., 2010)。

最近,高分辨率影像数据在月球表面发现了超过 4000 条年轻的挤压构造(图 1b)。它们切断了直径仅数米的新鲜撞击坑,表明这些挤压构造的年龄远小于 10 亿年,代表了月球上最年轻的地质构造(Watters et al., 2010; Xiao et al., 2017)。在嫦娥三号着陆点附近也发育大量此类年轻的挤压断层(Zhao et al., 2014)。它们的长度一般为百米和千米级,累积应变等效于月球半径减小~100m。在这些挤压构造的表面地形隆起上,常可小型伸展构造,它们是逆冲断层的上升盘运动后的应力卸载形成的(Watters et al., 2012)。该发现表明月球依然在发生全球收缩,这与地球物理数据发现月球内部存在熔融层吻合(Weber et al., 2011)。对阿波罗时期安装在月面上的月震仪获取的数据做事件定位,发现月壳内的一些浅源地震可能由断层活动触发(Watters et al., 2019),表明活动断层是未来月球基地建设需评估的风险。

3.2 金星构造演化简史

金星的大小、整体成分和内部结构与地球高度相似,但其自转特征、表面环境和地质演化与地球截

然不同。金星是一个火山的世界,~70% 的表面被熔岩平原覆盖,其余的区域被火山-构造组合覆盖。金星表面发育大量的伸展和挤压型地质构造,并具有丰富的组合样式(Masursky et al., 1980)。其中,复杂地体(terrerae)是多期、不同走向的伸展和挤压构造叠加的复杂构造单元(图 7a),代表金星表面最古老的地质单元。长数百公里、宽数十公里、高数百米的线形皱脊带是金星表面的主要挤压构造(图 7b),主要形成于较年轻的玄武岩平原上,其形貌和运动学特征与地球上一些逆冲推覆形成的造山带相似(Sengor, 1990)。金星上的一些大型火山建造可能是地幔柱活动形成的,在其周围可见大量疑似与放射性岩墙群相关的地堑系统。另外,在这些火山建造区可见长上千千米、宽数百千米、深数千米的裂谷带(图 7c),内部由大量复合的伸展断层嵌套叠加,与地球上的大陆裂谷区高度相似(Solomon et al., 1992)。这些裂谷是金星表面最年轻的地质构造之一。

金星全球共存在~1000 个撞击坑,大部分直径在 20 km 以上,空间上随机分布(Schaber et al., 1992)。虽然这些撞击坑具有不同的保存状态,但不同地层年龄的地质单元上的撞击坑密度并无明显差别,这表明金星全球的年龄大致相当。取决于使用的撞击坑年代方程,报道的全球模式年龄从 400~1000 Ma 不等,但均小于 10 亿年(Strom et al., 1994; Philips et al., 1994)。为解释金星如何丢失了早期~80% 的地质记录,渐变式和灾变式的地质活动是长期的争论(Bougher et al., 1997)。灾变论认为金星在大部分地质历史时期处于寂静状态,地质演化可能以脉动式的短时、全球火山-构造活动进行(Schaber et al., 1992);~10 亿年以来的一次短暂、快速的全球火山活动重置了表面的地质记录(Strom et al., 1994)。垂向增厚的金星岩石圈与亏损的幔部的密度差在达到一定临界值时发生重力翻转(Parmentier et al., 1992)、间歇性全球板块活动(Turcotte, 1993)等动力机制被用于解释灾变论的成因。渐变论认为金星表面持续的构造和火山活动不断改造表面,形成不同保存状态和交切关系的撞击坑,同时维持了不同地层年龄的表面上相似的撞击坑密度(Philips et al., 1994; O'Rourke et al., 2014)。

虽然金星表面的地质记录较短,但目前尚无证据表明金星上存在活跃的板块运动(Anderson, 1981; Solomon et al., 1991)。全球地层对比发现

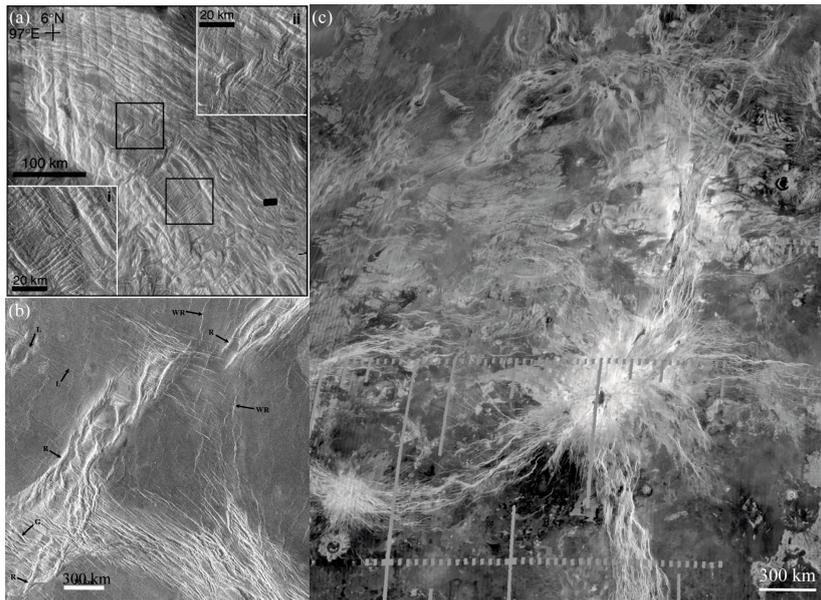


图 7 金星表面的地质构造,数据来自 NASA Magellan 任务

Fig. 7 Tectonic features on Venus, and the radar data were obtained by the Magellan mission

(a)—复杂地体由走向不同的伸展和挤压构造复合叠加形成,是多期构造运动的产物,代表金星表面最古老的地质单元之一;(b)—金星上的皱脊带,其中 C 为伸展构造;R 是皱脊,WR 是蜿蜒皱脊,L 为叶片状悬崖,以上为形态学分类。数据引自 McGill et al. (2010);(c)—金星 Beta Regio 为火山-构造区。图中可见大型火山区之间由深大裂谷系连接

(a)—Terra are chaotic terrains on Venus that contains multi-episodes of formation of extensional and contractional structures. Terra are the oldest terrains on Venus; (b)—Fold belt on Venus, where C denotes contractional structures, R represents ridges, WR represent wrinkle ridges, and L is for lobate scarps. The classification is entirely based on their surface morphology. This image is referred from McGill et al. (2010); (c)—The volcanic-tectonic Beta Regio on Venus contains large volcanic provinces and deep lithospheric fractures

金星表面的构造演化可分为 3 个阶段 (Ivanov et al., 2011): 最早的全局构造阶段,代表性产物为复杂地体和隆起平原;之后的全球火山活动阶段,形成数千个盾状火山和覆盖全球的熔岩平原,并在重力沉降过程中形成大量蜿蜒皱脊;在最后的裂谷系和局部火山活动阶段,形成一些深大裂谷系和局部的火山活动。前两个阶段进行迅速,而第三阶段则代表金星的主要地质历史。最近在金星上发现了一些可能依然活跃的小型火山活动,证明金星内部依然活跃 (Smrekar et al., 2010; Gülcher et al., 2020)。

3.3 火星构造演化简史

火星的表面形貌特征与地球有大量相似之处,例如二者均具有双峰式的全球地形分布、与表面耦合的大气圈、活跃的水圈等。当前的火星岩石圈缺乏板块活动的证据,热传导是岩石圈的主要散热机制。火星为何缺乏类似地球上的板块运动,一直是地球动力学研究的对比热点。为解释火星的地理和构造格架,例如南北地形和地壳厚度的二分性 (Sleep, 1994)、水手大峡谷的构造控制 (Yin A., 2012) 等,前人曾引入板块俯冲和大型走滑的假说,

但并未得到广泛支持 (Viviano-Beck et al., 2017)。

火星的大小和岩石圈厚度与水星相似,热演化模型预测火星可能和水星一样,经历了持续冷凝和全球收缩 (Schubert et al., 1990, Schubert et al., 1992)。火星表面分布大量的伸展和挤压构造,其中挤压构造近似全球分布 (图 8a); 伸展构造以地堑和半地堑的形式发育,主要位于大型火山区域周围 (图 8b)。另一方面,火山岩占火星表面 ~22 % 面积 (图 8b; Tanaka et al., 2014)。前诺亚纪的全球火山活动从 > 40 亿年前开始,持续到约 37 亿年前 (Greeley et al., 1991; Carr et al., 2010; Tanaka et al., 2014); 37~16 亿年之间的火山活动主要集中在少数几个火山区域 (Werner, 2009)。最近的高分辨率遥感数据发现了一些年龄为数十百万年的大面积、溢流型玄武岩区域 (Hauber et al., 2011), 表明火星的内动力过程可能依然活跃。这与火星陨石记录的年轻 (几个百万年) 火山活动吻合 (Carr et al., 2010; Hauber et al., 2011)。

火星上的挤压构造大多较老,如叶片状悬崖大多形成在诺亚纪的地质单元上,全球分布的蜿蜒皱脊主要位于西方纪的平原上 (Tanaka et al., 1991;

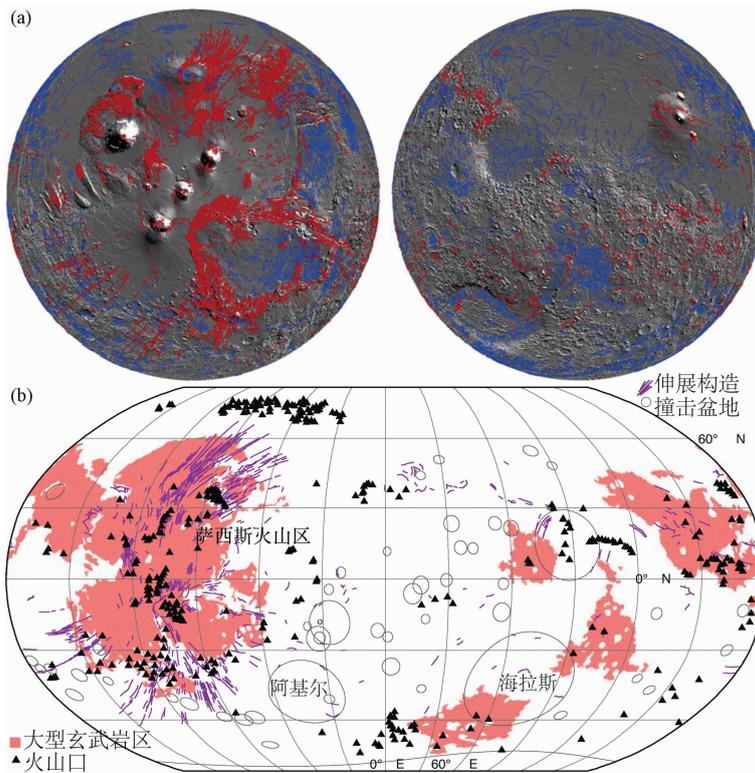


图 8 火星地质构造的全球分布特征

Fig. 8 Global distribution of tectonic features on Mars

(a) — 火星全球的伸展(红色线条)和挤压构造的空间分布(蓝色线条),引自 Nahm et al. (2011);

(b) — 火星上的主要火山单元、大型火山口、大型撞击盆地和伸展构造的空间分布关系,引自 Byrne (2020)

(a) — The global distribution of extensional (red curves) and contractional structures (blue curves) on Mars (Nahm et al., 2011);

(b) — Major volcanic provinces, calderas, giant basins and extensional structures on Mars (Byrne, 2020)

Watters, 1993)。但是,火星热演化的数值模拟预测,火星自早诺亚纪开始进入全球收缩阶段,且一直持续至今(Andrews-Hanna et al., 2008)。这与表面挤压构造的年龄分布不吻合(图 8a; Schubert et al., 1992)。有观点认为,火星可能经过脉动式的全球收缩,在晚诺亚纪和早西方纪(3.8~3.6 Ga)是收缩的峰值阶段(Schubert et al., 1992)。另一方面,火星上的伸展构造主要位于大型火山区域(图 8b),连续火山活动的记录超过 30 亿年。这表明该区域的岩石圈热演化类似于固定的盖层,持续地幔柱活动可能是支撑地形加载和长时间火山活动的主要动力机制(Zuber, 2001)。此外,对比火星表面的伸展和挤压构造所累积的应变量发现全球张应变可能大于模型预测的收缩应变(Nahm et al., 2011)。因此,火星全球收缩的速率是否发生过变化,尚需要更系统的全球构造填图来回答。近年来,在火星表面发现了大量年轻的地质构造(Brown et al., 2019),火星洞察号探测器(InSight)正在监听火震,以评估火星的内部结构和可能的热状态。

3.4 木卫二的地质构造

木卫二(Europa)是当前太阳系中唯一可能和地球相似存在全球板块运动的天体(Kattenhorn et al., 2014)。木卫一,木卫二和木卫三围绕木星公转的周期比是 1 : 2 : 4,产生拉普拉斯轨道共振。从木星向外,四颗伽利略卫星(也即木卫一,木卫二,木卫三和木卫四)受木星潮汐力的作用递减,地质活跃程度递减,表面逐渐年龄递增(Collins et al., 2010)。木卫二表面的撞击坑很少(Moore et al., 2001),可能是除了木卫一之外,全球平均年龄最小的太阳系天体,表面模式年龄不超过 90 百万年(Bierhaus et al., 2009)。这意味着木卫二表面经历了非常活跃的地质过程。

20 世纪 90 年代,NASA 伽利略(Galileo)计划对木星系统开展了探测。无线电多普勒和磁场观测表明,木卫二的冰层之下存在液态水圈(Khurana et al., 1998; Kiverson et al., 2000),厚度约为 100km(Sohl et al., 2002)。上部冰层的厚度从几千米到大于 30km 不等(Billings et al., 2005)。热动力学

计算木卫二上的撞击坑发生地形黏性恢复的程度,发现部分区域的冰壳厚度大于 10 km (Schenk, 2002)。在“岩石”力学性质方面,木卫二的冰壳可分为厚度仅数 km 的脆性圈和下部温度较高的塑性圈。木卫二表面大量新生的地质单元和活跃的气柱 (Jia X et al., 2018; Huybrighs et al., 2020) 表明木卫二的塑性圈层具有足够低的黏度,可能发生垂向对流。

受木星巨大的潮汐力的影响,在木卫二表面形成了大量的断层,包括 200 多条长度 1~200 km 的走滑断层 (Schenk et al., 1989, Prockter et al., 2000, Kattenhorn, 2004) 和走向弯曲、波长固定的摆线形张裂隙 (Hoppa et al., 1999a, Greenberg et al., 1998)。其中,走滑断层的空间分布方式与全日潮引起的应力分布吻合,也即北半球主要为左行走滑,南半球主要是右行走滑 (Hoppa et al., 1999b),滑距一般小于 10 km (图 3e)。摆线形张裂隙的走向与潮汐作用在木卫二冰壳内产生的主应力的变化方式吻合 (Hoppa et al., 1999b, 2001)。模拟研究表明摆线形张裂隙经历了应力累积和快速开裂的生长过程,走向上的平均生长速度超过 3 km/小时 (Hoppa et al., 1999b)。

木卫二表面 40% 的区域被扩张条带 (dilatational bands) 覆盖 (Figueredo et al., 2004)。扩张条带是张性裂隙在潮汐作用下反复伸开和闭合,上涌的水不断凝固而形成的新生冰壳 (图 9a),其形貌特征和形成过程与地球洋底的新生洋壳类似 (Prockter et al., 2002)。扩张条带的生长速率约为 40mm/a,和地球上板块扩张的速率相当 (Stempel et al., 2005)。前人曾认为木卫二上应该存在大量挤压构造,以协调扩张条带产生的巨量张应变。但是,挤压构造在木卫二上很少见 (图 9c),且其对应的应变变量很小 (Prockter et al., 2000; Culha et al., 2014)。

在木卫二 Falga Regio 北部约 13.4 万 km² 的区域,较高分辨率的影像数据揭示了各类伸展和走滑断层的空间分布特征。GIS 板块重建发现大约 2 万 km² 的区域无法恢复,意味着在构造运动过程中可能发生了俯冲消亡 (Kattenhorn et al., 2014)。疑似俯冲带的地貌表征是长达 1700 km、宽达 30 km、低地势、格子状的单元,被称为 subsumption zone (Kattenhorn et al., 2014)。在俯冲板片的上方,还可见与地球岛弧火山相似排列的冰火山地貌 (图 9b)。对木卫二其他区域的类似的研究也发现

了新生冰壳、转换断层、和俯冲的痕迹 (Cutler et al., 2015; Collins et al., 2016; Perkins et al., 2017; Rezza et al., 2017)。

在动力机制方面,数千米厚的弹性冰壳如何下插至温度较高的、厚度 20~30 km 的对流冰壳中? 纯水冰的密度低于下浮的温暖水冰,不可能直接在重力驱动下发生俯冲。但是,木卫二的脆性冰壳不只由纯水冰组成,表面可见分布不均匀的盐类。其来源可能是木卫一喷发的火山物质穿越轨道后在木卫二表面的沉积,或者由木卫二新生的冰壳注入 (McCord et al., 1998; Fischer et al., 2015)。这些盐类增加了脆性冰壳的密度,与下伏对流的暖冰层形成密度差,因此重力驱动下的板块俯冲成为可能 (Johnson et al., 2017; 图 9c)。模拟计算发现即使假设脆性冰壳的整体孔隙度接近 10%,表面 ~2.5 wt. % 的盐类即足以形成密度差,驱动冰壳俯冲 (Johnson et al., 2017)。

目前的观测表明木卫二上存在区域性的板块循环,且越来越多的证据表明板块循环可能具有全球分布的特征 (Kattenhorn, 2018)。木卫二的地下洋层与热源的交互作用形成了类似热泉的喷发柱 (Jia et al., 2018)。因此,木卫二是探测地外生命的重要阵地。由于伽利略号获取的数据的覆盖率和分辨率均有限,木卫二的脆性冰壳开始发生断陷的机制依然未知 (Kattenhorn, 2018)。即将开展的木星系统探测任务 JUICE 和 Clipper 探测器 (Phillips et al., 2014) 无疑将进一步明确木卫二表面的构造模式和内部动力过程。

4 行星地质构造对地球动力学的指示

20 世纪 60 年代发展和建立的板块构造理论被公认为“世纪自然科学领域的五大成就之一”,该理论的提出是一次地学革命,因为它重新调整了人们对地球动力学的传统认识。但是,正如本专辑其他论文和 2017 年出版的《中国学科发展战略·板块构造与大陆动力学》梳理所述,板块构造理论在动力机制上依然没有定论,在解释大陆形成和内部演化等方面依然面临着挑战。地质构造本质上是能量驱动下的物质变形。天体的形成和演化伴随着不同能量的注入和散失,地质构造在其他天体上也广泛发育。因此,综合对比地球与太阳系其他天体的构造演化特征是完整认识地球动力过程的必要研究 (Sleep et al., 2000; Elkins-Tanton, 2012; O'Neill et al., 2017; Stern et al., 2017)。

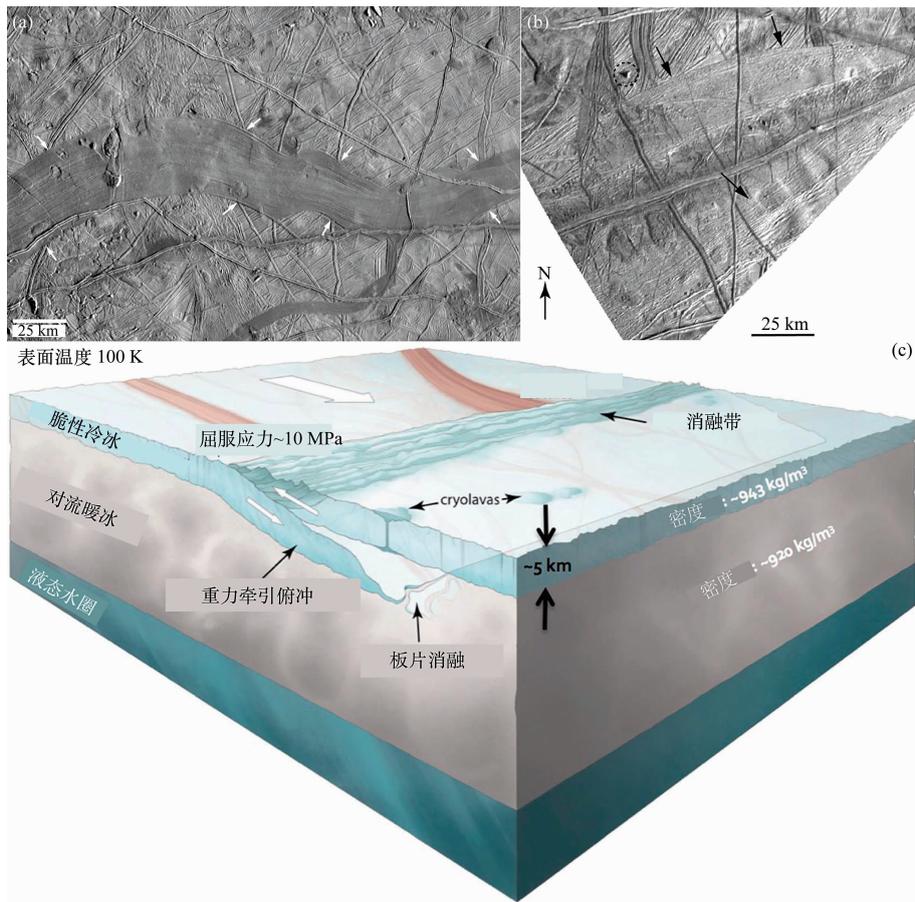


图9 木卫二上的地质构造

Fig.9 Tectonic features Europa

(a)一木卫二上的扩张条带,内部暗色的物质是新鲜的水冰,随着时间增加反照率升高。白色箭头指示扩张条带两侧被侧向错断的裂隙。引自 Collins et al. (2010);(b)一木卫二上的板块俯冲带,称之为消融带(subsumption band),其中穿插更年轻的裂隙。黑色线圈指示较老的残存地貌。引自 Kattenhorn et al. (2014);(c)一木卫二上俯冲带的构造模式图,引自 Kattenhorn (2018)

(a)—Extensional belt on Europa, and the dark stripes are fresh water ice that was newly exposed and the reflectance will be increased with time; the white arrows point to fractures that were displaced by the extensional belt (Collins et al., 2010); (b)—Potential subduction zones on Europa which is termed as subsumption bands, younger extensional fractures are visible within the bands, and the black dashed circle marks an older remnant terrain (Kattenhorn et al., 2014); (c)—Schematic diagram on the possible model of tectonism on Europa (Kattenhorn, 2018)

对比太阳系天体的地质构造和地球物理特征,可按内部的热透过岩石圈的散失机制,将构造应力的来源分为三个端元(Solomon et al., 1982):热传导、板块循环、和热管式火山活动(图10)。当岩石圈和更深的幔部物质的黏度差小于4个数量级时,岩石圈形成静止盖层(stagnant lid),热传导是岩石圈的主要散热方式(Reese et al., 1998)。当前,水星、月球、火星,可能也包括金星的岩石圈散热机制主要是热传导,因此挤压构造占主导。热传导作为岩石圈的主要散热机制,可能是所有类地天体热演化的终点(Stern et al., 2017)。木卫一的岩石圈主要通过全球大面积分布、时刻发生的火山喷发散热(也即热管式火山活动;heat piping volcanism),地

质构造主要受火山活动的影响,这可能是冥古宙地球的主要散热机制(Moore et al., 2013)。全球板块循环是当前的地球、可能也包括木卫二的岩石圈的主要散热机制。在天体的局部区域,其他动力过程可能是主要的构造应力来源,例如火星、金星和地球上的一些“超级地幔柱”和大型撞击盆地的区域。另外,天体的物质状态和能量来源随时间变化,因而岩石圈的散热机制在不同演化阶段也有差异,形成不同的表面构造。

在重建地球的早期历史时,比较行星学是重要的研究方法。对比不同天体、和同一天体不同区域或演化阶段的构造特征,需结合实际考虑可能的地质和地球物理特征。地球早期的内部生热效率曾远

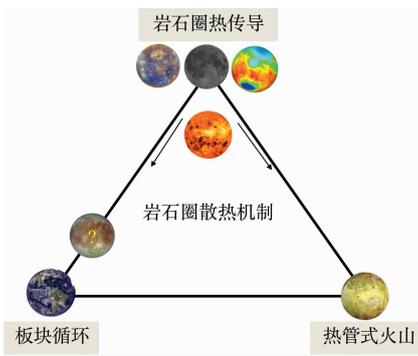


图 10 具有固体表面的天体的岩石圈散热机制三端元模式图(改编自 Solomon et al., 1982)。当前的水星、月球和火星的岩石圈主要通过热传导散热;地球岩石圈主要通过全球板块循环释热,木卫二可能也如此;木卫一主要通过全球的热管式火山活动释热。金星当前岩石圈可能主要通过热传导的方式散热,但地幔柱驱动的热管式火山活动也可能起主导作用,且金星是否正在进入下一个全球板块运动依然未知

Fig. 10 Three endmembers of cooling mechanism of planetary lithosphere. This figure is updated from Solomon et al. (1982) with modification. At present, the lithospheres of Mercury, the Moon, and Mars are cooled mainly via conduction, while global plate recycling is the major cooling mechanism of the Earth lithosphere, which may also be true for Europa; Io features the strongest activate volcanism in the Solar System, and heat piping via widespread and giant volcanic eruptions is the dominate cooling mechanism of Io's lithosphere. Conduction is likely the major mechanism of cooling of the present-day Venus lithosphere, but mantel plumes might have been important as well. It is still debated about whether or not Venus is entering another episode of global tectonism

高于放热效率,热管式火山活动可能是冥古宙地球岩石圈的主要散热机制(Moore et al., 2013)。太阳系天体,包括地球,早期经历的撞击频率和能量幅度巨大,足以改造全球的热结构。例如水星在~41亿年前后经历了密集的撞击盆地形成事件,可能触发了全球火山活动(Marchi et al., 2013)。由于撞击的扰动,该时期的地球上可能无法发育生命,但可能为长英质地壳的形成提供了区域性的热条件(Marchi et al., 2014)。在板块活动形成超大陆后,超大陆的岩石圈可能以静止盖层存在,降低幔部的散热速率,后续内部温度升高导致幔部对流加强而破坏盖层的稳定性(Ernst, 2008; Stern et al., 2017)。该模式与金星可能发生幕式板块活动(episodic tectonics)的假说相似(Moresi et al.,

1997)。总之,当前是我国大陆动力学和行星地质学发展的黄金时期,顺时应势地开展定量的比较行星学研究,将是完善地球动力学认识的重要举措。

致谢:本文受国家自然科学基金(41773063)资助。在关注行星地质构造发展的前提下,作者根据所了解的国内外研究态势进行了思考,仅供同行参考,不当之处请指正。

References

- Anderson E M. 1942. The dynamics of faulting and dyke formation, with application to Britain. *Nature*, 62(4): 651~652.
- Anderson D L. 1981. Plate tectonics on Venus. *Geophysical Research Letters*, 8: 309-311. doi: 10. 1029/GL008i004 p00309.
- Andrews-Hanna J C, Zuber M T, Hauck S A. 2008. Strike-slip faults on Mars: Observations and implications for global tectonics and geodynamics. *Journal of Geophysical Research*, 113: E08002. doi:10. 1029/2007JE002980.
- Andrews-Hanna J C, Asmar S W, Head J W, Kiefer W S, Konopliv A S, Lemoine F G, Matsuyama I, Mazarico E, McGovern P J, Melosh H J, Neumann G A, Nimmo F, Phillips R J, Smith D E, Solomon S C, Taylor G J, Wieczorek M A, Williams J G, Zuber M T. 2013. Ancient igneous intrusions and early expansion of the Moon revealed by GRAIL gravity gradiometry. *Science*, 339: 675~678.
- Bierhaus E B, Zahnle K, Chapman C R. 2009. Europa's crater distribution and surface ages. In Pappalardo R T, McKinnon W B, Khurana K, eds: *Europa*, Tucson; The University of Arizona Press, 161~180.
- Billings S E, Kattenhorn S A. 2005. The great thickness debate: Ice shell thickness models for Europa and comparisons with estimated based on flexure at ridges. *Icarus*, 177: 397~412.
- Bougher S W, Alexander M J, Mayr H G. 1997. Upper Atmosphere Dynamics: Global Circulation and Gravity Waves. In Bougher, S W, Hunten D M, Phillips R J, eds; *Venus II*, Tucson, AZ, The University of Arizona Press, 259~291.
- Brown J R, Roberts G P. 2019. Possible evidence for variation in magnitude for marsquakes from fallen boulder populations, Grjota Valles, Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 124: 801 ~ 822. <https://doi.org/10.1029/2018JE005622>
- Byrne P K, Ostrach L R, Fassett C I, Chapman C R, Denevi B W, Evans A J, Klimczak C, Banks M E, Head J W, Solomon S C. 2016. Widespread effusive volcanism on Mercury likely ended by about 3.5 Ga. *Geophysical Research Letters*, 43: 7408~7416.
- Byrne P K, Klimczak C, Celal Sengor A M. 2018. The tectonic Character of Mercury. In Solomon S C, Nittler L R, Anderson B J, (eds). *Mercury: The View after MESSENGER*. Cambridge, Cambridge University Press, 249~286.
- Byrne P K. 2020. A comparison of inner Solar System volcanism. *Nature Astronomy*, 4: 321~327
- Carr M H, Head J W. 2010. Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letter* 294, 185~203.
- Clark R M, Cox S. 1996. A modern regression approach to determining fault displacement-length scaling relationships. *J. Struct. Geol.* 18, 147~152.
- Collins G C, McKinnon W B, Moore J M, Nimmo F, Pappalardo R T, Prockter L M, Schenk P M. 2010. Tectonics of outer planet satellites. In Watters T R, Schultz R A, eds., *Planetary Tectonics*. Cambridge University Press, 264~350.
- Collins G C, Cutler B B, Brenes Coto J P, Prockter L M, Patterson G W, Kattenhorn S A, Rhoden A R, Cooper C M. 2016. Plate motions on Europa from Castalia Macula to Falga

- Regio. 47th Lunar and Planetary Science Conference, Abstract 2533.
- Cowie P A, Scholz C H. 1992a. Physical explanation for the displacement-length relationship of faults using a post-yield fracture-mechanics model. *J. Struct. Geol.* 14, 1133~1148.
- Cowie P A, Scholz C H. 1992b. Displacement-length scaling relationship for faults data synthesis and discussion. *J. Struct. Geol.* 14, 1149~1156.
- Culha C, Hayes A G, Manga M, Thomas A M. 2014. Double ridges on Europa accommodate some of the missing surface contraction. *Journal of Geophysical Research Planets*, 119(3): 395~403.
- Cutler B B, Collins G C, Prockter L M, Patterson G, Kattenhorn S A, Rhoden A, Cooper C M. 2015. Reconstructing plate motions on Europa with GPlates. *Eos, Trans. AGU*, 95, Abstract P31B-2059.
- Elkins-Tanton L T. 2012. Magma oceans in the inner solar system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 40, 113~139. doi:10.1146/annurev-earth-042711-105503.
- Ernst W G. 2008. Archean plate tectonics, rise of Proterozoic super continentality and onset of regional, episodic stagnant-lid behavior. *Gondwana Research* 15(3~4), 243~253.
- Figueredo P H, Greeley R. 2004. Resurfacing history of Europa from pole-to-pole geological mapping. *Icarus* 167 (2), 287~312.
- Fischer P D, Brown M E, Hand K P. 2015. Spatially resolved spectroscopy of Europa: The distinct spectrum of large-scale chaos. *The Astronomical Journal*, 150:164, 1~9.
- Golombek M P, McGill G E. 1983. Grabens, basin tectonics, and the maximum total expansion of the Moon. *J. Geophys. Res.* 88, 3563~3578.
- Golombek M P, Bridges N T. 2000. Erosion rates on Mars and implications for climate change; Constraints from the Pathfinder landing site. *Journal of Geophysical Research* 105, 1841~1853.
- Gülcher A J P, Gerya T V, Montési L G J, Munch J. 2020. Corona structures driven by plume ~ lithosphere interactions and evidence for ongoing plume activity on Venus. *Nat. Geosci.* 13, 547~554.
- Greeley R. 2013. *Introduction to Planetary Geomorphology*. Cambridge University Press.
- Greeley R, Schneid B D. 1991. Magma generation on Mars; amounts, rates, and comparisons with Earth, Moon, and Venus. *Science* 254, 996~998.
- Greenberg R, Geissler P, Hoppa G, Tufts B A, Durda D D, Pappalardo R P, Head J W, Greeley R, Sullivan R, Carr M H. 1998. Tectonic processes on Europa; Tidal stresses, mechanical response, and visible features. *Icarus*, 135(1): 64~78.
- Grossenbacher K A, McDuffie S M. 1995. Conductive cooling of lava; Columnar joint diameter and stria width as functions of cooling rate and thermal gradient. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 69(1), 95~103.
- Hartmann W K, Neukum G. 2001. Cratering chronology and the evolution of Mars. *Space Science Reviews* 96 (1~4), 165~194.
- Hauber E, Brož P, Jagert F, Jodłowski P, Platz T. 2011. Very recent and wide-spread basaltic volcanism on Mars. *Geophysical Research Letters*, 38; L10201.
- Hiesinger H, Head J W, Wolf U, Jaumann R, Neukum G. 2011. Ages and stratigraphy of lunar mare basalts; A synthesis. *Geological Society of America Special Papers* 477; 1~51.
- Höfner S, Vincent J B, Blum J, Davidsson B J R, Sierks H, El-Maarry M R, Deller J, Hofmann M, Hu X, Pajola M, Barbieri C, Lamy P L, Rodrigo R, Koschny D, Rickman H, Keller H U, A'Hearn M F, Auger A T, Barucci M A, Bertaux J L, Bertini I, Bodewits D, Cremonese G, Da Deppo V, Debei S, De Cecco M, Fornasier S, Fulle M, Gicque A, Groussin, Gutiérrez P J, Gutiérrez-Marqués P, Güttler C, Hviid S F, Ip W H, Jorda L, Knollenberg J, Kovacs G, Kramm J R, Kührt E, Küppers M, La Forgia F, Lazzarin M, Lopez-Moreno J J, Marzari F, Michalik H, Moissl-Fraund R, Moreno F, Mottola S, Naletto G, Oklay N, Preusker F, Scholten F, Shi X, Thomas N, Toth I, Tubiana C, Zitzmann S. 2017. Thermophysics of fractures on comet 67P/Churyumov-Gerasimenko. *Astronomy and Astrophysics* 608; A121.
- Hoppa G V, Tufts B R, Greenberg R, Geissler P. 1999a. Strike-slip faults on Europa: Global shear patterns driven by tidal stress. *Icarus*, 141; 287~298.
- Hoppa G V, Tufts B R, Greenberg R, Geissler P. 1999b. Formation of cycloidal features on Europa. *Science*, 285; 1899~1902.
- Hoppa G V, Tufts B R, Greenberg R, Hurford T A, O'Brien D P, Geissler P E. 2001. Europa's rate of rotation derived from the tectonic sequence in the Astypalaea region. *Icarus*, 153; 208~213.
- Huybrighs H L F, Roussos E, Blöcker A, Krupp N, Futaana Y, Barabash S, Hadid L Z, Holmberg M K G, Lomax O, Witasse O. 2020. An active plume eruption on Europa during Galileo flyby E26 as indicated by energetic proton depletions. *Geophysical Research Letter*, 47; e2020GL087806.
- Ivanov M A, Head J W. 2011. Global geological map of Venus: *Planetary and Space Science*, 59; 1559~1600.
- Jaeger J C, Cook N G W, Zimmerman R W. 2007. *Fundamentals of Rock Mechanics*. London, Blackwell.
- Jerram D A, Widdowson M. 2005. The anatomy of continental flood basalt provinces; Geological constraints on the processes and products of flood volcanism. *Lithos* 79, 385~405.
- Jia X, Kivelson M G, Khurana K K, Kruth W S. 2018. Evidence of a plume on Europa from Galileo magnetic and plasma wave signatures. *Nature Astronomy* 2, 459~464.
- Johnson B C, Sheppard R Y, Pascuzzo A C, Fisher E A, Wiggins S E. 2017. Porosity and salt content determine if subduction can occur in Europa's ice shell. *J. Geophys. Res. Planets*, 122, <https://doi.org/10.1002/2017JE005370>.
- Kattenhorn S A. 2004. Strike-slip fault evolution on Europa: Evidence from tailcrack geometries. *Icarus* 172, 582~602.
- Kattenhorn S A, Prockter L M. 2014. Evidence for subduction in the ice shell of Europa. *Nature Geoscience* 7(10), 762~767. doi:10.1038/NNGEO2245.
- Kattenhorn S A. 2018. Commentary: The Feasibility of Subduction and Implications for Plate Tectonics on Jupiter's moon Europa. *J. Geophys. Res. Planets* 10.1002/2018JE005524.
- Khurana K, Kivelson M, Stevenson D, Schubert G, Russell C T, Walker R J, Polanskey C. 1998. Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto. *Nature*, 395(6704); 777~780.
- Kivelson M G, Khurana K K, Russell C T, Volwerk M, Walker R J, Zimmer C. 2000. Galileo Magnetometer Measurements; A Stronger Case for a Subsurface Ocean at Europa. *Science* 289 (5483), 1340~1343.
- Klimczak C, Ernst C M, Byrne P K, Solomon S C, Watters T R, Murchie S L, Preusker F, Balcerski J A. 2013. Insights into the subsurface structure of the Caloris basin, Mercury, from assessments of mechanical layering and changes in long-wavelength topography. *Journal of Geophysical Research: Planet*, 118; 2030~2044.
- Klimczak C. 2014. Geomorphology of lunar grabens requires igneous dikes at depth. *Geology* 42, 963~966.
- Klimczak C, Byrne P K, Solomon S C. 2015. A rock-mechanical assessment of Mercury's global tectonic fabric. *Earth and Planetary Science Letter* 416, 82~90.
- Marchi S, Chapman C R, Fassett C I, Head J W, Bottke W F, Strom R G. 2013. Global resurfacing of Mercury 4.0-4.1 billion years ago by heavy bombardment and volcanism. *Nature*, 499; 59~61.
- Marchi S W F, Bottke L T, Elkins-Tanton, M. Bierhaus, K. Wuenemann, A. Morbidelli, and D. A. Kring (2014). Widespread mixing and burial of Earth's Hadean crust by

- asteroid impacts. *Nature*, 511, 578~582.
- Marrett R, Allmendinger R W. 1991. Estimates of strain due to brittle faulting; Sampling of fault populations. *J. Struct. Geol.* 13, 735~738.
- Massironi M, Kim Y S. 2014. Strike-Slip Faults. In: Hargitai, H., Kereszturi A., (eds.), *Encyclopedia of Planetary Landforms*. Springer, New York. doi:10.1007/978-1-4614-9213-9_548-1.
- Massironi M, Di Achille G, Rothery D A, Galluzzi V, Giacomini L, Ferrari S, Zusi M, Cremonese G, Palumbo P. 2015. Lateral ramps and strike-slip kinematics on Mercury. In Platz, T., Massironi, M., Byrne, P. K., and Heisinger, H., (eds.), *Volcanism and Tectonism Across the Solar System*. Special Publication 401, London, Geological Society, 269~290.
- Masursky H, Eliason E, Ford P G, McGill G E, Pettengill G H, Schaber G G, Schubert G. 1980. Pioneer Venus Radar results; Geology from images and altimetry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 85, 82832~8260.
- McCord T B, Hansen G B, Clark R N, Martin P D, Hibbitts C A, Fanale F P, Granahan J C, Segura M, Matson D L, Johnson T V, Carlson R W, Smythe W D, Danielson G E. 1998. Non-water-ice constituents in the surface material of the ice Galilean satellites from the Galileo near-infrared mapping spectrometer investigation. *Journal of Geophysical Research*, 103, 8603~8626.
- McGill G E, Stofan E R, Smrekar S E. 2010. Venus tectonics. In Watters, T. R., Schultz, R. A., (eds.), *Planetary Tectonics*. Cambridge University Press, 81~121.
- Melosh H J. 1989. *Impact Cratering: A Geologic Process*. New York, Oxford University Press.
- Milazzo M P, Keszthelyi L P, Jaeger W L, Rosiek M, Mattson S, Verba C, Beyer R A, Geissler P E, McEwen A S, the HiRISE Team. 2009. Discovery of columnar jointing on Mars. *Geology*, 37(2), 171~174.
- Milazzo M P, Weiss D K, Jackson B, Narnes J. 2012. Columnar jointing on Mars: Earth analog studies. 43rd Lunar and Planetary Science Conference, Abstract 2726.
- Moore W B, Webb A A G. 2013. Heat-pipe Earth. *Nature*, 501, 501~505.
- Moore J M, Asphaug E, Belton M J S, Moore J M, Asphaug E, Belton M J S, Bierhaus B, Herbert Breneman H, Brooks S M, Chapman C R, Chuang F C, Collins G C, Giese B, Greeley R, Head J W, Kadel S, Klaasen K P, Klemaszewski J E, Magee K P, Moreau J, Morrison D, Neukum G, Pappalardo R T, Phillips C B, Schenk P M, Senske D A, Sullivan R J, Turtle E P, Williams K K. 2001. Impact features on Europa; Results of the Galileo Europa Mission (GEM). *Icarus*, 151(1), 93~111.
- Moresi L N, Solomatov V S. 1997. Three regimes of mantle convection with non-Newtonian viscosity and stagnant lid convection on the terrestrial planets. *Geophysical Research Letters* 24(15), 1907~1910.
- Montesi L G T, Zuber M T. 2003. Clues to the lithospheric structure of Mars from wrinkle ridge sets and localization instability. *Journal of Geophysical Research: Planet*, 1991~2012. doi:10.1029/2002JE001974.
- Murchie S L, Watters T R, Robinson M S, Head J W, Strom R G, Chapman C R, Solomon S C, McClintock W E, Prockter L M, Domingue D L, Blewett D T. 2008. Geology of the Caloris basin, Mercury; A view from MESSENGER. *Science* 321, 73~76.
- Nahm A L, Schultz R A. 2011. Magnitude of global contraction on Mars from analysis of surface faults; Implications for martian thermal history. *Icarus* 211(1), 389~400.
- Nahm A L, O'hman T, Kring D A. 2013. Normal faulting origin for the Cordillera and Outer Rook Rings of Orientale Basin, the Moon. *J. Geophys. Res.* 118, 190~205.
- Neukum G. 1983. *Meteoritenbombardement und Datierung planetarer Oberflächen*, Habilitation Thesis, Univ. München, Munich, Germany.
- Neukum G, Ivanov B A, Hartmann W K. 2001. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system. *Space Science Reviews* 94(1/4), 55~86.
- Niño F, Philip H, Chéry J. 1998. The role of bed-parallel slip in the formation of blind thrust faults. *J. Struct. Geol.* 20, 503~516.
- O'Neill C, Marchi S, Zhang S, Bottke A. 2017. Impact-driven subduction on the Hadean Earth. *Nature Geoscience* 10, 793~797. doi:10.1038/NGEO3029.
- O'Rourke J G, Wolf A S, Ehlmann B L. 2014. Venus; Interpreting the spatial distribution of volcanically modified craters. *Geophysical Research Letters* 41, 8252~8260.
- Ouyang Z, Li C, Zou Y, Zhang H, Chang L, Liu J, Liu J, Zuo W, Su Y, Wen W, Bian W, Zhao B, Wang J, Yang J, Chang J, Wang H, Zhang X, Wang S, Wang M, Ren X, Mu L, Kong D, Wang X, Wang F, Geng L, Zhang Z, Zheng L, Zhu X, Zheng Y, Li J, Zou X, Xu C, Shi S, Gao Y, Gao G. 2010. Primary scientific results of Chang'E-1 lunar mission. *Science China Earth Sciences* 53(11), 1565~1581.
- Parmentier E M, Hess P C. 1992. Chemical differentiation of a convecting planetary interior; Consequences for a one plate planet such as Venus. *Geophysical Research Letters* 19, 2015~2018.
- Patthoff D A, Kattenhorn S A. 2011. A fracture history on Enceladus provides evidence for a global ocean. *Geophysical Research Letters* 38 (18), 113 ~ 120. doi: 10.1029/2011RL048387.
- Perkins R P, Patterson G W, Prockter L M, G C Collins, Kattenhorn S A, Rhoden A R, Cooper C M. 2017. An analysis of plate motions on Europa associated with the formation of Astypalaea and Libya Lineae. 48th Lunar Planet. Sci. Conf. Abstract 2576.
- Phillips R J, Raubertas R F, Arvidson R E, Sarkar I C, Herrick R R, Izenberg N, Grimm R E. 1994. Impact craters and Venus resurfacing history. *J. Geophys. Res.* 97, 15923~15948.
- Phillips C B, Pappalardo R T. 2014. Europa Clipper Mission Concept: Exploring Jupiter's Ocean Moon. *Eos Transactions American Geophysical Union* 95(20): 165~167.
- Plescia J B, Golombek M P. 1986. Origin of planetary wrinkle ridges based on the study of terrestrial analogs. *Bryologist* 97 (11), 10~12.
- Prockter L M, Pappalardo R T. 2000. Evidence for regional-scale folds on Europa. 31st Lunar and Planetary Science Conference, Abstract 1182.
- Prockter L M, Head J W, Pappalardo R T. 2002. Morphology of European bands at a high resolution: A mid-ocean ridge-type rift mechanism. *J. Geophys. Res.* 107. doi: 10.1029/2000JE001458.
- Reese C C, Solomatov V S, Moresi L N. 1998. Heat transport efficiency for stagnant lid convection with dislocation viscosity: Application to Mars and Venus. *Journal of Geophysical Research* 103(E6), 13643~13657.
- Rezza C A, Collins G C, Prockter L M, Patterson G W, Rhoden A R, Kattenhorn S A, Cooper C M. 2017. Multi-stage reconstruction of plate motions south of Castalia Macula. Europa. 48th Lunar Planet. Sci. Conf. Abstract 2283.
- Robinson M S, Brylow S M, Tschimmel M, Humm D, Lawrence S J, Thomas P C, Denevi B W, Bowman-Cisneros E, Zerr J, Ravine M A, Caplinger M A, Ghaemi F T, Schaffner J A, Malin M C, Mahanti P, Bartels A, Anderson J, Tran T N, Eliason E M, McEwen A S, Turtle E, Jolliff B L, Hiesinger H. 2010. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) Instrument Overview. *Space Science Reviews* 150(1-4), 81~124.
- Schaber G G, Strom R G, Moore H J, Soderblom T, Kirk R L, Chadwick D, Dawson D D, Gaddist L R, Boyce M, Russet I. 1992. Geology and distribution of impact craters on Venus: What are they telling us? *Journal of Geophysical Research*, 97, 13257~13301.

- Schenk P M, McKinnon W B. 1989. Fault offsets and lateral crustal movement on Europa; Evidence for a mobile ice shell. *Icarus* 79, 75~100.
- Schenk P M. 2002. Thickness constraints on the icy shells of the galilean satellites from a comparison of crater shapes. *Nature* 417, 419~421.
- Scholz C H, Dawers N H, Yu J Z, Anders M H, Cowie P A. 1993. Fault growth and fault scaling laws; Preliminary results. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth*, 98(B12): 21951~21961.
- Schubert G, Spohn T. 1990. Thermal history of Mars and the sulfur content of its core. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 95(B9): 14095~14104.
- Schubert G, Solomon S C, Turcotte D L, Drake M J, Sleep N H. 1992. Origin and thermal evolution of Mars. In Kieffer H. H., Jakosky, B. M., Snyder, C. W., and Matthews, M. S., (eds.), *Mars*. Tucson, AZ. University of Arizona Press, 147~183.
- Schultz R A, Watters T R. 2001. Forward mechanical modeling of the Amenthes Rupes thrust fault on Mars. *Geophys. Res. Lett.* 28: 4659~4662.
- Schultz R A, Fossen H. 2002. Displacement-length scaling in three dimensions; The importance of aspect ratio and application to deformation bands. *J. Struct. Geol.* 24: 1389~1411.
- Schultz R A, Okubo C H, Wilkins S J. 2006. Displacement-length scaling relations for faults on the terrestrial planets. *J. Struct. Geol.* 28: 2182~2193.
- Schultz R A, Hauber E, Kattenhorn S A, Okubo C H, Watters T R. 2010a. Interpretation and analysis of planetary structures. *Journal of Structural Geology* 32: 855~875.
- Schultz R A, Soliva R, Okubo C H, Mège D. 2010b. Fault populations. In Watters, T. R., Schultz, R. A., (eds.), *Planetary Tectonics*. Cambridge University Press, 457~511.
- Sengör A M C. 1990. Plate tectonics and orogenic research after 25 years; A Tethyan perspective. *Earth-Science Reviews*, 27: 1~201.
- Sleep N H. 1994. Martian plate tectonics. *Journal of Geophysical Research* 99, 5693~5655. doi:10.1029/94JE00216.
- Sleep N L. 2000. Evolution of the mode of convection within terrestrial planets. *Journal of Geophysical Research* 105(E7), 17563~17578. doi:10.1029/2000JE001240.
- Smrekar S E, Stofan E R, Mueller N, Treiman A, Elkins-Tanton L, Helbert J, Piccioni G, Drossart P. 2010. Recent hotspot volcanism on Venus from VIRTIS emissivity data. *Science* 328: 605~608.
- Sohl F, Spohn T, Breuer D, Nagel N. 2002. Implications from Galileo Observations on the Interior Structure and Chemistry of the Galilean Satellites. *Icarus* 157(1): 104~119.
- Solomon S C, Chaiken J. 1976. Thermal expansion and thermal stress in the Moon and terrestrial planets; clues to early thermal history. In *Proc. Lunar Planet. Sci. Conf.*, 7: 3229~3243.
- Solomon S C, Head J W. 1980. Lunar mascon basins; lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere. *Rev. Geophys. Space. Phys.* 18: 107~141.
- Solomon S C, Head J W. 1982. Mechanisms for lithospheric heat transport on Venus; Implications for tectonic style and volcanism. *Journal of Geophysical Research; Solid Earth* 87 (B11): 9236~9246.
- Solomon S C, Head J W, Kaula W M, McKenzie D, Parson B, Phillips R J, Schubert G, Talwani M. 1991. Venus tectonics; Initial analysis from Magellan. *Science*, 252: 297~312.
- Solomon S C, Smrekar S E, Bindschadler D L, Grimm R E, Kaula W M, McGill G E, Phillips R J, Saunders R S, Schubert G, Squyres S W. 1992. Venus tectonics; An overview of Magellan observations. *J. Geophys. Res.* 97: 13199~13255.
- Stempel M M, Barr A C, Pappalardo R T. 2005. Model constraints on the opening rates of bands on Europa. *Icarus* 177, 297~304.
- Stern R J, Gerya T, Tackley P J. 2017. Stagnant lid tectonics; Perspectives from silicate planets, dwarf planets, large moons, and large asteroids. *Geoscience Frontiers* 9, 103~119. doi:10.1016/j.gsf.2017.06.004.
- Strom R G, Neukum G. 1988. The cratering record on Mercury and the origin of impacting objects. In *Mercury*. Tucson, AZ, University of Arizona Press, 336~373.
- Strom R G, Schaber G G, Dawson D D. 1994. The global resurfacing of Venus. *Journal of Geophysical Research* 99, 10899~10926.
- Tanaka K L, Golombek M P, Banerdt W B. 1991. Reconciliation of stress and structural histories of the Tharsis region of Mars. *J. Geophys. Res.* 96, 15617~15633.
- Tanaka K L, Skinner J A, Dohm J M, Irwin R P, Kolb E J, Fortezzo C M, Platz T, Michael G G, Hare T M. 2014. *Geologic Map of Mars; U. S. Geological Survey Scientific Investigations Map 3292, scale 1 : 20,000,000 pamphlet*. doi: 10.3133/sim3292.
- Taylor L A, Shervais J W, Hunter R H, Shih C Y, Bansal M, Wooden J, Nyquist L E, Laul L C. 1983. Pre-4.2 AE mare-basalt volcanism in the lunar highlands. *Earth and Planetary Science Letters* 66: 33~47.
- Toramaru A, Matsumoto T. 2004. Columnar joint morphology and cooling rate: A starch-water mixture experiment. *Journal of Geophysical Research* 109, B02205.
- Turcotte D L. 1993. An episodic hypothesis for Venusian tectonics; *Journal of Geophysical Research* 98, 17061~17068. doi:10.1029/93JE01775.
- Viviano-Beck C E, Murchie S L, Beck A W, Dohm J M. 2017. Compositional and structural constraints on the geologic history of eastern Tharsis Rise, Mars. 284: 43~58.
- Walsh J J, Watterson J, Yielding G. 1991. The importance of small-scale faulting in regional extension. *Nature* 351: 391~393.
- Walsh J, Watterson J. 1988. Analysis of the relationship between displacements and dimensions of faults. *J. Struct. Geol.* 10, 239~247.
- Watters T R. 1993. Compressional tectonism on Mars. *J. Geophys. Res.* 98, 17049~17060.
- Watters T R, Robinson M S, Beyer R A, Banks M E, Bell J F, Pritchard M E, Hiesinger H, van der Bogert C H, Thomas P C, Turtle E P, Williams N R. 2010. Evidence of recent thrust faulting on the Moon revealed by the Lunar Reconnaissance Orbiter Camera. *Science* 329: 936~940.
- Watters T R, Johnson C H. 2010. Lunar Tectonics. In Watters, T. R., and Schultz, R. A., (eds.), *Planetary Tectonics*. Cambridge University Press, 121~182.
- Watters T R, Schultz R A. 2010. *Planetary Tectonics*. Cambridge, UK, Cambridge University Press.
- Watters T R, Solomon S C, Klimczak C, Freed A M, Head J W, Ernst C M, Blair D M, Goudge T A, Byrne P K. 2012. Extension and contraction within volcanically buried impact craters and basins on Mercury. *Geology*, 40: 1123~1126.
- Watters T R, Weber R C, Collins G C, Howley I J, Schmitt N C, Johnson C L. 2019. Shallow seismic activity and young thrust faults on the Moon. *Nature Geoscience*, 12: 411~417.
- Watterson J. 1986. Fault dimensions, displacements and growth. *Pure Appl. Geophys.* 124: 365~373.
- Weber R C, Lin P, Garner E J, Williams Q, Lognonné P. 2011. Seismic detection of the lunar core. *Science*, 331: 309~312.
- Werner S C. 2009. The global Martian volcanic evolutionary history. *Icarus*, 201: 44~68.
- Wilson J T. 1963. Hypothesis of Earth's behavior. *Nature* 198: 925~929.
- Xiao L. 2014. China's touch on the Moon. *Nature Geoscience*, 7: 391~392.
- Xiao Zhiyong, Strom R G, Zeng Zuoxun. 2013. Mistakes in using crater size-frequency distributions to estimate planetary surface ages. *Earth Science (in Chinese with English abstract)*, 38(1): 145~160.
- Xiao Z, Zeng Z, Li Z, Blair D M, Xiao L. 2014. Cooling fractures in impact melt deposits on the Moon and Mercury; Indications

- of cooling solely by thermal radiation. *Journal of Geophysics Research*, 119; 1496~1515. doi:10.1002/2013JE004560.
- Xiao Z, Huang Q, Zeng Z, Xiao L. 2017. Small graben in the southeastern ejecta blanket of the lunar Copernicus crater; Implications for recent shallow igneous intrusion on the Moon. *Icarus*, 298; 89~97.
- Yin A. 2012. An episodic slab-rollback model for the origin of the Tharsis rise on Mars; Implications for initiation of local plate subduction and final unification of a kinematically linked global plate-tectonic network on Earth. *Lithosphere* 4, 553~593. doi:10.1130/L195.1.
- Yin A, Zuza A V, Pappalardo R T. 2016. Mechanics of evenly spaced strike-slip faults and its implications for the formation of tiger-stripe fractures on Saturn's moon Enceladus. *Icarus* 266, 204~216.
- Zhao J, Huang J, Qiao L, Xiao Z, Huang Q, Wang J, He Q, Xiao L. 2014. Geologic characteristics of the Chang'E-3 exploration region. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 57 (3): 569~576.
- Zuber M T. 2001. The crust and mantle of Mars. *Nature*, 412 (6843): 220~227.

参 考 文 献

- 肖智勇, Strom R G, 曾佐勋. 2013. 撞击坑统计技术在行星表面定年应用中的误区. *地球科学——中国地质大学学报* 38(1), 145~160.

Planetary tectonics: indicatorsto earth's evolution

XIAO Zhiyong^{*1)}, XU Zhiqin²⁾

1) *Planetary Environmental and Astrobiological Laboratory, School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai, Guangdong, 519000;*

2) *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing, 210023*

** Corresponding authors: xiaozhiyong@mail.sysu.edu.cn*

Abstract

Tectonic features on Earth record the interior and exterior dynamics of our planet. Similar to the Earth, widespread tectonic features exist on the other planetary bodies. Planetary tectonics is targeted at resolving the tectonics features, their evolution, and the related dynamics on theplanetary bodies. This discipline is built on traditional structural geology, remote sensing, geophysics, and many others. Due to differences in size, bulk composition, and orbital positions of planetary bodies, tectonic features across our solar system exhibit rich diversity. Thermal evolution of the Moon, Mercury, and Mars follow a similar track, and currently their lithospheres lose heat primarily via conduction, so that tectonic features observed on the three bodies are highly comparable. Mars has witnessed a potential pulse of global contraction, while large volcanic provinces that were possibly driven by giant mantel plumes strongly affect the distribution of both extensional and constructional structures. The first ~80% history of Venus has been completely removed by subsequent magmatic-tectonic activity, and the maximum surface age is much less than the average age of the Earth's continental crust. Thermal conduction is perhaps the dominantheat dissipation mechanism of Venus lithosphere, andthe abundant volcanic-tectoniccomplexes on the surface (such as giant crustal rift systems) indicate that mantel plumes have played a critical role in the history of Venus. Vertical movements dominate tectonism on the above terrestrial bodies while horizontal shearing is minimum. On the other hand, most satellites of the giant planets in the outer Solar System exhibit icy or other volatile-rich crusts, underneath which some have warm oceans. Tide, instead of radioactiveheat, is the major source thatdrives the interior dynamics of many icy satellites. Due to both the special orbital characteristics and heterogeneous crustal structures, the stress fields on these bodies are highly variable with time, andboth vertical and horizontal movements are abundant. Long strike-slip faults and possible subduction zones have recently been discovered. The study of planetary tectonics is based onthe various energy sources and material properties, addressing the interior dynamics from both physical and chemical perspectives. Therefore, planetary tectonics and Earth dynamics are complementary. Referring to planetary tectonics is fundamentally important to solve persistentmysteries related with Earth (especially continental) dynamics, such as the origin of plate tectonics, formation of continents, and interior dynamics within continents.

Key words: tectonics; planet; Moon; satellites; lithosphere; thermal evolution

《地质学报》(中文版)“地学新知”、“地学科普”公开征集 稿件简则

《地质学报》是中国地质学会主办的地质科学学术刊物。《地质学报》反映地质科学各分支学科及边缘学科中最新、最高水平的基础理论研究和基本地质问题研究成果。《地质学报》(中文版)和《地质学报》(英文版)分别独立刊载论文。

为提高刊物与学科前沿研究领域的交互,让读者更多了解和普及地学新知,增加作者投稿热情与读者阅读兴趣,《地质学报》(中文版)拟增设“地学新知”和“地学科普”两个栏目,现向国内外各地学研究机构的专家学者们公开征集相应稿件。稿件具体要求如下。

一、“地学新知”和“地学科普”栏目征稿范围:

“地学新知”栏目征稿范围为地质学研究领域的新知识、新发现、新成果、新理论、新问题等,文章要侧重“新”字,围绕学科前沿领域研究展开撰写,并向国内外地质学界推荐展示;

“地学科普”栏目征稿范围为地质学各细分研究领域的最新成果,特别注意稿件科普对象并非普通大众,而是要求作者从自身所处分支学科出发,向地质学其他分支学科的研究人员“科普”自己细分领域的研究成果,以期达到交流学习目的。

二、《地质学报》编辑部与作者约定如下:

1. 作者应保证稿件不一稿两投,并对所投稿件拥有无可争议的著作权。

2. “地学新知”和“地学科普”两个栏目的稿件均需通过网上办公系统进行网上投稿,且投稿时一定要在备注中注明所投栏目,《地质学报》(中文版)投稿网址为 <http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>。请将文、图、表放入同一个 Microsoft Word 文件中(07 版以下为宜,请作者自留原始文件,以备修改,详细投稿办法见网站说明)。投稿成功与否以编辑部网站收稿回执为准。

3. 不得将投向本编辑部的稿件同时投至其他刊物,否则视为一稿两投。

4. 编辑部承诺一般在 90 日内给出刊用与否的通知。作者在 90 日内,不应将稿件另投他刊。

5. 对决定录用的稿件,作者应根据编辑部提供的修改意见修改后,向编辑部提交论文 Word 文档、清绘好的 CorelDRAW 图件等。

6. 稿件文责自负,若做实质性修改,须征得作者同意。

三、对投稿内容格式的要求:

每篇文章应包含下列要素:文章题目(不多于 25 个汉字)、作者、作者单位、作者简介、正文、图表(可有可

无)、致谢(可有可无)等。重要内容说明如下:

1. **正文:**排版后一般不超过 4 页(依纯文字计,大约相当于不超过 5000 字,若有图表等,则字数应更少些)。作者自行按行文逻辑划分章节。

2. **图件:**不是必须,但若有图件,请严格按照下列要求进行绘制。

① 凡涉及国界的图件必须绘制在地图出版社公开发表的最新地理底图上。

② 图件请用 CorelDraw X4 版本格式最好(且不是导入的)。若为其他软件编成的图件,需提供 600 dpi 的 TIF 格式的文件。彩色照片(包括图版)需提供 600 dpi 以上的 JPG 格式文件。

③ 图件大小:排半栏时:图宽不超过 80mm,最高 245mm;排通栏时:图宽不超过 168mm,最高 245mm;整版卧排:图宽不超过 235mm,最高 170mm(以上高度均含图名和说明)。中文字体请用宋体,英文和数字请用 Time New Roman,字号为 6~8p 大小,均不加粗。

④ 图件不同区域可用通用地质花纹(或符号)区分,除照片外,一般不用灰度图。若必须用灰度图表示不同区域时,灰阶应尽量少,阶差应尽量地大。

⑤ 图件若为彩色照片者,可选择集中制成图件。须注意,照片按我刊要求出版时必须彩印。

⑥ 图号、表号应按顺序编写,并在正文中也应按相应顺序全部出现。

3. **参考文献:**可不列参考文献,若必须列参考文献,请严格按照下列要求进行编排,且一定保证正文中引用的文献与参考文献列表中的文献保持一一对应。

本刊采用著者年制,正文中用圆括号列出第一作者和年代,同一作者同时列出多篇文献时,次序按年代先后。

所有文献均放在“参考文献”标题之下,按中文、英文、日文、西文、俄文、其他文排列。文献均按“第一作者姓名字母音序+年代”先后排列。各条参考文献的具体格式请参考我刊相应要求编写。

4. **注释:**非必须。引用非公开出版物时在文后单列注释一栏,格式与参考文献相同。参考文献及注释详细格式可见《地质学报》修改注意事项。

5. **作者简介:**主要介绍作者的学术经历,包括资助项目、姓名、性别、学历、职称、研究方向、Email 等,具体格式可参考我刊已发表的最新文章。