

制约类地行星大气层 和水体发育的主要因素^{*}

欧阳自远^{①②③} 邹永廖^③ 李春来^③
刘建忠^③ 徐琳^①

(①中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002; ②中国科学院地球化学研究所环境
地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002; ③中国科学院国家天文台, 北京 100012)

摘要 根据行星探测的资料, 综合分析了水星、金星、地球(包括月球)、火星的大气层和水体的发育特征, 对比了金星、火星的大气层与水体同地球的差异。类地行星质量小、体积小、密度大、旋转慢、卫星少甚至没有, 挥发性元素较类木行星少, 距离太阳较近, 早期残留的原始大气层已经被早期太阳在金牛变星阶段的强烈太阳风所驱赶, 加上巨大而频繁的撞击作用, 使原始大气层被驱赶殆尽。现在的大气层是次生的, 是由行星内部的去气作用形成的。类地行星的大气层、水体的发育和表生作用的特征与行星的质量大小(表征行星内部能量的大小和构造活动的强烈及持续时间)及行星与太阳的距离等因素有关。在类地行星中, 地球和金星质量最大, 逃逸速度最大, 可将更多的气体“束缚”在它们表面, 因此它们的大气有着复杂的组成和较大的密度。火星质量较小, 逃逸速度不到地球的一半, 在漫长的演化历史中, 大气逐渐逸散进入太空, 大气密度变得很稀薄。水星质量更小, 而且最靠近太阳, 不仅太阳风的驱赶作用强烈, 而且表面温度高, 气体分子的热运动更加剧烈, 加剧了大气的逸散, 所以水星的大气层极为稀薄, 并且主要为太阳风成分。月球质量最小, 几乎没有大气层, 更没有水体的发育。行星的热演化历史对大气层和水体发育具有重要的制约作用。总之, 类地行星大气层和水体的发育, 受到行星质量的大小、行星的热演化程度和行星与太阳的距离所制约。

关键词 类地行星 大气层 水体 制约因素

太阳系中的水星、金星、地球和火星称为内行星或类地行星, 它们体积较小, 具有固体的岩石表面, 可以用地质学的方法来研究(包括月球通常与类地行星进行比较研究); 火星之外的木星、土星、天王星和海王星4个巨行星, 也称类木行星, 它们主要由氢、氦和其它轻元素组成。太阳系最外缘的冥王星, 是一个小的石质天体, 由于其独特的运动轨道和物理化学性质, 被认为第3种类型的行星。行星轨道都接近于圆形, 基本上位于同一平面内, 与太阳赤道面接近; 行星绕太阳运动的方向与其自转方向相同, 并且与太阳的旋转

第一作者简介: 欧阳自远 男 66岁 研究员、中国科学院院士 天体化学与地球化学专业

E-mail: ouyangzy@bao.ac.cn

* 中国科学院知识创新工程项目(批准号: KZCX2-115)和中国科学院高技术与发展局专项项目(批准号: KGCX2-406)

2002-06-30收稿, 2002-09-04收修改稿

方向一致; 行星及其卫星的分布是有规律的, 行星与太阳的距离和规则卫星离中心行星的距离均服从提丢斯—波德定则; 行星的物理性质和物质成分与其距太阳的距离有关。类地行星质量小、体积小、密度大、旋转慢、卫星少甚至没有、挥发性元素较少(表 1); 类木行星则相反, 它们质量大、体积大、密度小、旋转快、卫星多、挥发性元素含量很高。

表 1 类地行星的主要参数^[1]Table 1 The main parameters of the terrestrial planets^[1]

名称	水星	金星	地球	月球	火星
与太阳的距离/ 10^3 km	57 910	108 200	149 600	384. 4(与地球距离)	227 940
半径/km	2 439. 7	6 051. 8	6 378. 14	1 737. 4	3 397. 2
质量/kg	3.303×10^{23}	4.869×10^{24}	5.976×10^{24}	7.349×10^{22}	6.421×10^{23}
密度/ $g \cdot cm^{-3}$	5. 42	5. 25	5. 515	3. 34	3. 94
逃逸速度/ $km \cdot s^{-1}$	4. 250 7	10. 362	11. 182	2. 376 0	5. 022 5
反照率	0. 10	0. 65	0. 37	0. 12	0. 15
公转周期/d	87. 969	224. 701	365. 256	27. 321 66	686. 98
轨道倾角 $^{\circ}$	7. 004	3. 394	0. 000	5. 145 4	1. 850
自转轴倾角 $^{\circ}$	0. 00	177. 36	23. 45	1. 542 4	25. 19
轨道偏心率	0. 205 6	0. 006 8	0. 016 7	0. 05	0. 093 4
自转周期/d	58. 646 2	- 243. 018 7	0. 997 27	27. 321 66	1. 025 957
平均轨道速度/ $km \cdot s^{-1}$	47. 87	35. 02	29. 79	1. 02	24. 13
表面温度/K	740	730	287		218
表面压力/atm *	0	99	1	10^{-14}	0. 007
大气成分	H, He, Ne, Ar	CO ₂ , N ₂	N ₂ , O ₂ , Ar	H, He, Ne, Ar	CO ₂ , N ₂ , Ar

* 1atm = $1.013 25 \times 10^5$ Pa

类地行星形成时的原始大气层曾经被强烈的太阳风驱赶尽, 现有的大气层属次生大气层。类地行星大气层与水体的发育和演化过程受到行星的质量大小、行星的演化程度和行星与太阳的距离所制约^[1~7], 主要控制了类地行星的表生作用、“生态环境”特征和“全球变化”过程^[1~4]。

1 类地行星的大气层与水体

1.1 类地行星大气层的成分和主要特点

类地行星大气层状况、大气层主要成分、大气压和表面温度、高层大气等的特征见表 2。

表 2 类地行星大气层的成分和主要特点^[1,2,5]Table 2 The atmospheric compositions and main properties of the terrestrial planets^[1,2,5]

行星	大气层概况	大气的主要成分	大气压和表面温度	高层大气	其它
水星	很稀薄的大气层	Ar, Kr, Xe, He, H ₂ , O, CO ₂ , 和 Ne 等	< 0. 003atm *, 600~ 740K		
金星	表面为云层所覆盖, 具有浓密大气层	CO ₂ 约 95%, N ₂ 4. 5%, H ₂ O 约 1%, O, S, Cl 等 < 0. 1%	约 99atm *, 650~ 700K	主要由 H 组成, 而 D 很少	表面具有明显的温室效应

续表 2

行星	大气层概况	大气的主要成分	大气压和表面温度	高层大气	其它
地球	大气层	N ₂ 78.1%, O ₂ 21.0%, Ar 0.93%, Ne 1.8× 10 ⁻⁵ , CO ₂ 3.0× 10 ⁻⁴ , CH ₄ 1.5× 10 ⁻⁶ , H ₂ O 0.1%~2.8%	约 1atm [*] , 240~320K	电离层(50~ 1000km), 地球 有一个由 H 和 He 组成的厚 1000km 以上的地冕	
火星	稀薄大气层, 低云 层由水-冰组成, 大气中 CO ₂ 不凝 结成各种云, 高云 层由凝结的 CO ₂ 组成	海盗号宇宙探测器发 现火星大气由 CO ₂ 95%, ¹⁴ N 和 ¹³ N 2%~ 3%, ⁴⁰ Ar 1%~2%, O ₂ 0.13% 以及 H, N ²⁺ , CO, CO ²⁺ , CO ⁺ , CN, Kr 和 Xe 组成	0.005~0.007atm [*] , 203~295K	很薄的电离层	表面在低洼处 有一层薄的雾 霾, 表明土壤有 水蒸气排出
月球	基本上没有大气	主要为太阳风成分, 如 H, D, He, Ne, Ar 和 N 等	10 ⁻¹⁴ atm [*] , 380K(白 昼), 120K(黑夜)		

* 1 atm = 1.013 25 × 10⁵ Pa

1.2 水星的大气层和水体的主要特点

水星几乎没有大气层, 表面气压 < 0.003atm¹⁾, 表面平均温度约 350~400K, 赤道正午温度达 700K, 而背离太阳的一面温度仅 100K。稀薄的水星大气主要由 H₂, CO₂ 和惰性气体组成, 由于水星内部排气的速率小于气体逃逸的速率, 加上强烈的太阳风的驱赶和电离作用, 大部分原始水星大气已散失尽。水星表面没有发现任何水体^[1, 2, 8]。

1.3 金星的大气层和水体的主要特点

金星有一浓密的大气圈, 大气压高达 99 atm¹⁾, 主要成分为 CO₂, 此外含少量的 N₂, S, Cl, H₂O 等气体。金星大气层中有几层几公里厚的由大量硫酸液滴组成的云层, 45~60km 高度的黄色云层主要由 10^μm 大小的硫酸液滴组成, 云层顶部之下几十公里处, 可能下着腐蚀性的硫酸雨。低层大气含有 HCl 和 HF^[9]。金星的自转周期长达 243 个地球日, 但它发育有两个巨大而强烈的大气对流环流, 每 4 个地球日环绕金星一周, 在云层顶部风速可达到 350km/s, 而在金星表面时速仅有几公里。由于金星的大气对流, 金星表面没有季节和昼夜的明显差别, 甚至两极和赤道的温差也很小, 表面温度可高达 700K。金星表面现在非常干燥。金星曾经可能像地球一样有过大量的水, 由于表面温度太高而蒸发逸散。

1.4 地球和月球的大气层及水体的主要特点

地球的大气主要由 N₂, O₂, Ar, CO₂, H₂O 和其它一些微量气体组成, 总质量约为 5 × 10¹⁵ t。

1) 1 atm = 1.013 25 × 10⁵ Pa

地球大气的最大特点是, 其化学组成不仅受内部去气、海气交换和化学作用的制约, 而且受到生物作用的严重影响。地球的水体覆盖了地球表面近 72% 的面积。

月球表面几乎没有大气层 (10^{-14} atm¹⁾) 和大气活动, 由于没有大气的热传导, 月球白昼温度为 130~150 °C, 太阳不能照射到的阴影区和夜晚温度为 -180~160 °C。月球表面没有液态水, 更没有任何生命存在的痕迹。1994 年发射的克莱门丁号探测器以及 1998 年发射的月球勘探者号探测器, 在探测月球南、北极区撞击坑的永久阴影区时, 发现有含量极低的水冰与月壤混合。目前对月球表面上水冰的来源较公认的看法是, 当彗星撞击月表时, 撞击体剧烈破碎, 其碎块溅射落在原有的撞击坑永久阴影区与月壤混合。初步估算全月面水冰的资源量大约为 66 亿吨。

月球的岩石有极微弱的剩磁, 磁化强度约 $2 \times 10^{-6} \sim 4 \times 10^{-6}$ 电磁单位/g, 月球周围没有磁场; 当月球运行到地球与太阳之间的新月位置时, 不受地球磁层影响, 只受太阳风控制; 若处于满月位置, 则刚好处于地球的中远磁层结构和动力学十分重要区域, 属太阳风阴影区。月球表面热流平均为 $2 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 内部的地温梯度很小, 月球内部能量近于衰竭, 月震能释放 $< 10^6 \text{J/h}$, 每年月震释放的能量相当于地震的 $10^{-9} \sim 10^{-14}$ 。

月球表面物质主要受到以下 3 种辐射源的辐射, 即太阳风、太阳耀斑和银河宇宙线。1) 太阳风是指从太阳日冕向行星际空间辐射出来的连续的等离子体粒子流, 可能代表太阳日冕的成分, 能量为 1keV/核子的太阳风粒子平均速度为 4 000km/s。太阳风中稀有气体的丰度相对氢而言, 与光球和日冕的丰度相似。太阳风粒子直接注入月壤内, 深度可达 30~50mm, 引起和产生某些微观尺度大小的变化和影响, 月壤中积累并蕴藏有丰富的太阳风成分, 成为具有巨大开发利用前景的能源资源。2) 太阳耀斑粒子比太阳风能量高, 一般为 10~100 MeV/核子。太阳耀斑粒子直接注入月壤, 或产生宇宙成因核素, 在表面 1mm~1cm 的深度内形成太阳耀斑核径迹(有时达 10^{11} 径迹/ cm^2)。3) 银河宇宙线来自太阳系外, 粒子能量达 100~10 000MeV/核子。银河宇宙线的主要成分为质子、氦核, 极少量的重核 ($z = 18 \sim 28$) 及超重、超高能粒子 ($z > 28$)。银河宇宙线与月壤、月岩产生一系列核反应, 形成多种宇宙成因核素。宇宙成因核素分布可深达 2m, 宇宙线径迹在矿物中的长度一般为长石 > 辉石 > 橄榄石^[10, 14]。

月壤中的稀有气体不可能是月球原始大气层残留的产物, 而是多途径来源: 俘获的太阳风粒子, 注入的太阳耀斑粒子, 由太阳质子和银河宇宙线与月壤物质相互作用产生散裂反应形成的 ^3He , ^{20}Ne , ^{21}Ne , ^{22}Ne , ^{38}Ar 等核素; 由 U, Th 和 K 衰变产生的 ^4He , ^{40}Ar ; 由重核裂变产生的 Kr, Xe 和由中子俘获产生的 Xe 等。其中月壤中的 ^{40}Ar 比预计来自太阳风俘获、 ^{40}K 衰变的量要高几个数量级, 这种 ^{40}Ar 的异常可能是长期以来由月球内部 ^{40}K 衰变产生的 ^{40}Ar , 挥发到月球表面后被太阳辐射所电离, 然后这些离子被伴随太阳风的磁场所加速重新注入月球表面的土层中; 大于 1keV 的离子均被很细的月壤颗粒所俘获, 从而引起月壤中 ^{40}Ar 的高度异常。太阳风组分的直接注入是月壤中这些稀有气体的主要来源, 这些稀有气体同位素比值与太阳风比较接近, 而与地球大气层差别很大(表 3)。

1) 1atm = $1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$

表 3 月壤俘获的稀有气体同位素组成与太阳风、地球大气层的比较^[1]Table 3 Isotopic compositions of noble gases captured in lunar soil; A comparison with the solar wind and Earth's atmosphere^[1]

样品	同 位 素 比 值				
	⁴ He/ ³ He	⁴ He/ ²⁰ Ne	²⁰ Ne/ ²² Ne	²² Ne/ ²¹ Ne	²⁰ Ne/ ³⁶ Ar
月壤细粒粉末	2 300~ 2 800	96±18	12.4~ 12.8	31±1.2	
太阳风	2 350±120	570±70	13.7±0.03	30±4	28±9
地球大气层	7×10 ⁵	0.3	9.8±0.08	34.5±1.0	0.5

1.5 火星的大气层、水体和表生作用的主要特点

1.5.1 火星的大气层和水体

火星是迄今除地球外研究程度最高的行星。火星的大气非常稀薄,表面大气压仅为 5~7mbar,但是火星的大气成分却与金星相似,主要由约 95.32%的 CO₂, 2.7%的 N₂ 和 1.6%的 Ar 组成(表 4)。火星大气与地球大气相比较,前者最为特征的是¹⁴N—¹⁵N 比值异常低,已成为鉴别火星物质的重要标志。火星大气(见表 4)与地球大气相比较,呈现出明显的⁴⁰Ar—³⁶Ar 和¹²⁹Xe—¹³²Xe 比值过剩,这是火星内部物质的衰变和裂变所产生,并通过释气过程进入大气层。海盗号、哈勃太空望远镜、火星探路者、火星全球勘探者等探测器对火星进行了详细的探测,证明火星虽然空气稀薄,但由于温度分布不均匀,火星大气的运动非常剧烈,平均风速达 4.3m/s,风向变幻不定,并常有尘暴产生,像地球上的台风一样,裹着尘土和碎石,在火星表面肆虐。尘暴是当今火星表面物质搬运的最主要形式。

表 4 火星表面大气成分^[5,15,16]Table 4 The composition of the atmosphere at the surface of Mars^[5,15,16]

气体名称	所占比例	
二氧化碳(CO ₂)	95.32%	
氮(N ₂)	2.7%	
氩(Ar)	1.6%	
氧(O ₂)	0.13%	
一氧化碳(CO)	0.07%	
水蒸气(H ₂ O)	0.03%	
氖(Ne)	2.5 μ1/L	
氪(Kr)	0.3 μ1/L	
氙(Xe)	0.08 μ1/L	
臭氧(O ₃)	0.03 μ1/L	
	同位素比值	
比值	地球	火星
¹² C/ ¹³ C	89	90
¹⁶ O/ ¹⁸ O	499	500
¹⁴ N/ ¹⁵ N	277	165
⁴⁰ Ar/ ³⁶ Ar	292	3 000
¹²⁹ Xe/ ¹³² Xe	0.97	2.5

火星由于大气极为稀薄,几乎不直接吸收辐射,也难以通过大气运动传递表面的热量,所以火星表面温度变化较大。海盗号探测器的两个着陆点昼夜的温度变化约 50°C ,夏季的平均温度为 -60°C ,冬季温度达 -120°C 。当大气中存在大量尘埃时,在大尘暴期间和之后,大气通过尘埃对太阳光的吸收而被直接加热,近火星表面的温度振荡被抑制,结果,火星表面的温度起伏很小,但在高空大气的温度起伏较大。火星的两极与赤道的温差很大,两极覆盖着随季节变化的冰盖。火星表面的大气压随季节发生变化,在冬季,大气中大量的 CO_2 凝聚到极冠,使大气压减小。大气压的变化更多地受南极极冠的控制。火星的大气循环主要是由季节的温度梯度和大气在两极之间的运动所驱动的,因为 $20\% \sim 30\%$ 的大气在冬季会凝结到极地冰盖中去,从而引起大气的运动。冬季,在极地地区大的温度梯度产生不稳定性,导致气旋和反气旋风暴系统的发展。其余时期,直接由全球大气循环引起的风较小,更重要的是潮汐风、斜坡风和与大型尘暴有关的风。在每个火星年中,当火星靠近近日点时都会在南半球发生尘暴,然后向整个火星扩展。尘暴的发生起源于风速高的地方,这些地方往往有大的斜坡或很高的温度梯度,如极冠的边缘地带。在南半球的夏天,当表面温度达到最高时,尘暴最常见,尘埃进入大气导致潮汐风的增加,又会扬起更多的尘埃,使风得到增强,所以尘暴能够自我传播并可能吞没整个火星。当尘暴将足够多的尘埃带入大气,以致大气的温度发生完全均一时,尘暴就会停止,大约 4 个月后,尘埃沉淀,大气恢复到尘暴以前的透明。

火星释气产生的大部分挥发分是被固定在火星表面,而不是进入大气层。火星表面的土壤和细粒玄武岩对 CO_2 有很高的吸收能力。由于火星风化壳的成分和结构的不确定性,火星表面吸附的 CO_2 的总量尚难以确定。估计火星大气层中的 CO_2 还不到释气作用产生的 CO_2 的十分之一。在极地地区存在风化碎屑的厚层沉积,它们对挥发分有很高的吸收能力,因此火星轨道倾斜度变化会对年平均温度产生影响,从而影响表面与大气层之间 CO_2 气体的交换。由于这一交换作用,估计在倾斜周期火星大气压的变化范围为 $0.5 \sim 22\text{mbar}$ 。

火星表面也可能含有大量的水和水冰,液态水在火星表面的任何地方都是不稳定的,而固态冰在赤道地区也不稳定,甚至有证据表明,在赤道 30° 以内地区,如果冰在地表以下与大气呈扩散接触,冰也处在不稳定状态。如果永久冻土带含有冰,它必须与大气隔离。相反,在极地 40° 以内地区,冰在 10cm 以下是稳定的,在中纬度地区,近地表的冰只在一年中的一段时间内是稳定的。因此,火星表面保存水的能力取决于地层隔离大气的程度。极地永久性极冠和沉积地区可能固定了相当于 30m 厚的水体,另外有 15m 的水可能被吸收或化学键合在风化壳中,释气作用产生的其余的水可能在巨厚风化壳中以地下水或地表冰的形式存在。

火星上可分辨出 3 种不同类型的河道:侵蚀河道、径流河道和溢流河道。河谷系统提供了火星早期历史温和气候条件的证据,当时液态水能够以相对适度的流量在火星表面流动。这种气候条件持续的时间应该相当短或侵蚀速率非常低,因为火星上从来没有形成过成熟的排水系统。尽管大多数溢流河道的年龄都较老,但在火星的整个历史中都能形成,甚至在现在的气候条件下也有可能形成。溢流河道形成的最合理的机制是突发性

的洪水。

风的侵蚀和运移是火星的地质作用之一。尽管有几十亿年的风蚀作用,但火星上并没发育大型的风蚀地貌,大部分古老的撞击坑地貌都保存完好,甚至溅射物的细微结构都得以保存。火星上最广泛的沙丘群见于北极,几百公里宽的沙丘群围绕层状沉积物形成几乎连续的环状。在南半球高纬度地区,沙丘也很常见,它们几乎都被限制在撞击坑内部或悬崖附近;在中、低纬度地区,沙丘不太常见,仅在掩体的地方,如在平原—高地边界的大峡谷或河谷中存在。火星沙丘多为横向类型,经向沙丘极少。火星上的新月形沙丘与地球上的性质完全一样,表明它们的形成过程是相同的,都是因为向风面向斜坡上滚动,而在背风面反复崩塌而形成的。

季节性的 CO_2 极冠通常在秋季形成,在春季消退。季节性冰盖的平均厚度仅为几十厘米。由于南极的冬天较长,南极极冠的范围比北极要大,最大时可到达南纬 50° ,而北极极冠最大时也仅扩展到北纬 65° 处。极冠并不是均衡地退却。仲夏时节,残余的南极极冠的直径约为 350km,而北极为 1 000km。在夏天北极极冠的上空存在大量的水蒸气,表明北极极冠几乎是由水冰组成的。在南极极冠上空几乎检测不出水。极地层状沉积物大多数位于 80° 纬度之内,其层位基本上是水平的。沉积物表面撞击坑很稀少,表明其形成年龄很年轻。北极地区沉积物的厚度约为 4~6km,南极地区约为 1~2km。

总之,火星气候的变化受控于火星轨道偏心率和倾斜度的循环变化,偏心率的变化会影响两极之间差别的程度,而倾斜度的变化则会影响太阳辐射的纬度分布,显然,这些变化是尘暴强度和影响范围的主要影响因素,也会影响极地挥发分的稳定性和局部风力的大小,从而大大影响沉积和侵蚀的速率。目前它们的作用机制尚不清楚。

1.5.2 火星与地球表生作用的比较

火星在很多方面像地球,但火星大气层比地球稀薄得多。大量的证据表明,火星的近表面存在水和冰,它们使火星的部分表面受到了侵蚀,并与近表面物质发生反应形成风化产物。火星与地球之间的主要差别是构造运动和水体发育的差异。地球表面的地质作用主要是板块构造,岩石圈板块之间的相互作用控制了陆地的分布、山链的形成、火山和构造活动的地点以及地壳变形的形式。相反,火星的地壳是固定的,缺乏板块运动的特征,如山链、横推断层带、线状海沟等。火星地壳的稳定性也使得绝大部分火星表面保存了古老的记录。

尽管火星历史的大部分时期都有火山活动和构造运动,但其岩石圈并不与下伏的软流圈发生物质循环。火星与地球表面存在的另一个明显差别是地球上有大量液态水。水在地球的风化、侵蚀和沉积作用过程中起到了决定性的作用。作为对比,在火星历史上,尽管水可能在火星表面流淌过,然而河流的侵蚀作用微不足道。火星虽然是一个活动的行星,地表起伏大,但各个时期和各种成因的地质特征都得以保存。

2 制约类地行星大气层和水体发育的主要因素

行星大气层起源的理论认为,类地行星由于距太阳近,早期残留的原始大气层已经被早期太阳在金牛变星阶段的强烈太阳风所驱赶,加上巨大而频繁的撞击作用,使原始大气层被驱赶殆尽。现在的大气层是次生的,是由行星内部的去气作用形成的。而巨行星的

质量大, 温度低, 它们的大气层主要是原始大气成分。

2.1 类地行星的质量大小和与太阳的距离对大气层和水体发育的制约

总体看来, 类地行星的大气层、水体的发育和表生作用的特征与行星的质量大小(表征行星内部能量的大小和构造活动的强烈及持续时间)及行星与太阳的距离等因素有关(见表 1)。在类地行星中, 地球和金星质量最大, 逃逸速度最大, 可将更多的气体“束缚”在它们表面, 因此它们的大气有着复杂的组成和较大的密度; 火星质量较小, 逃逸速度不到地球的一半, 在漫长的演化历史中, 大气逐渐逸散进入太空, 大气层变得很稀薄; 水星质量更小, 而且最靠近太阳, 不仅太阳风的驱赶作用强烈, 而且表面温度高, 气体分子的热运动更加剧烈, 加剧了大气的逸散, 所以水星的大气层极为稀薄, 并且主要为太阳风成分; 月球质量最小, 几乎没有大气层, 更没有水体的发育(见表 2)。

2.2 行星的热演化历史对大气层和水体发育的制约

类地行星的质量大小决定了行星内部能量的产生和积累以及能量散失的快慢, 也主导了行星的热演化历史和行星现今内部的热状态。水星和月球(质量分别为 3.303×10^{23} kg 和 0.73×10^{23} kg), 这类质量小的类地行星, 形成后受到急剧的加热, 早期产生过剧烈的构造岩浆和火山活动, 并分异成壳、幔和核。月球在距今 31.5 亿年前, 水星可能在距今 15 ~ 20 亿年前, 基本上终结了构造岩浆和火山活动, 内部物质分异、调整很不充分。由于这类行星质量小、体积小, 热量散失快, 过早地固化, 去气过程产生的气体不被行星所俘获, 不能形成大气层。行星演化后期构造、岩浆活动几乎停滞。这类质量小的行星表面保持了古老的火山地形和冲击形成的盆地、环形冲击坑。

质量大的行星, 在经历了早期全球性的强烈的构造岩浆和火山活动之后, 行星内部的物质熔融、分异、调整现今仍在持续进行, 核、幔、壳的相互作用, 构造运动、岩浆活动至今仍很活跃。内部物质通过去气过程产生的气体被行星俘获, 形成浓密的大气层, 地球还形成了广泛分布的水体。各种内、外营力使地球的地形不断改造, 因而表面被年轻的岩石或地层所覆盖。金星没有水体的发育, 只形成了极其浓密的大气层。

火星介于两者之间, 具有过渡型的性质, 早期构造岩浆和火山活动剧烈, 内部物质分异调整尚充分。热量的积累和失散也介于水星与地球之间, 去气过程产生的气体仅部分为行星所俘获, 因而构成很稀薄的大气层。火星表面有明显的风和冰的剥蚀及沉积作用, 使火星表面的地形受到一定程度的改造。

2.3 大气层与水体的协同演化和非协同演化的特征

金星和地球的质量及与太阳的距离相近, 但是它们的大气层和水体的发育却截然不同, 演化的过程差异显著。地球大气层和水体的演化经历了极其复杂的过程: 地球通过内部物质的熔融除气过程, 共排出了约 1.743×10^{24} g 挥发性物质, 其中 CO_2 约为 1.218×10^{23} g。如果地球没有广泛分布的水体, 没有碳酸盐的沉积和植物的光合作用, 现今地球大气层中 CO_2 的分压将接近 20 大气压。根据我们的研究, 在 35 亿前, 地球内部通过强烈的火山活动排出大量的 H_2O , CO_2 , CO , S_2 , Cl , H_2 , N_2 , Ar , O_2 和 NH_4 等, 形成初始的强酸性大

气层(原始火山大气层),水蒸气凝结后逐渐在地面形成强酸性水体;在 25 亿年前,地球大气层仍然是以火山的喷气产物为主,但水圈演化成为氯化物水圈,海水的 pH 值可能 ≤ 4 。在 20 亿年前后,水圈演化为氯化物—碳酸盐水圈,海水的 pH 值为 4~5,大气层中的 CO₂ 分压较高,但在海水中的溶解度仍较低,因而大气层中积累了大量的 CO₂,在元古代,地球大气演化为 CO₂ 大气层。此后,随着海水 pH 值的增大,CO₂ 的溶解度增高,出现大量的碳酸盐沉淀,特别是古生代大量动植物的出现,使大气层中 CO₂ 的分压下降,O₂ 含量迅速上升,大气逐渐演化为现今的氮—氧大气圈。地球大气层与水体的发育呈现出一种协同演化的特征。

金星与地球不同,金星是逆向旋转的,旋转速度很慢,旋转一周需 243 地球日,金星没有明显的板块俯冲的迹象,金星的大气层和行星表面上水的丰度均很低,但有丰富的原始氢。金星的除气过程与地球相似,除气过程也会释放 CO₂ 和 H₂O,但由于金星距太阳较近,表面温度高(650~700K),H₂O 很快被光解,氢进入空间逃逸,氧则与金星的表面物质发生氧化反应。由于温室效应,金星表面始终没有形成过水体,CO₂ 始终残留在大气层内,并且加剧了温室效应,因此金星大气是富含 CO₂ 的极浓密的大气层。金星内部除气过程排出的强酸性的气体,在大气循环中形成酸性成分的云和强腐蚀性的酸雨。金星大气层和水体的发育过程呈现出一种非协同演化的特征。

类地行星大气层和水体的发育,受到行星质量的大小、行星的热演化程度和行星与太阳的距离所制约。

参 考 文 献

- 1 欧阳自远. 天体化学. 北京: 科学出版社, 1988. 63~92, 93~145
- 2 Pollack J B. Atmosphere of the terrestrial planets. In: Beatty J K, Chaikin A eds. The New Solar System. London: Cambridge University Press, 1990. 1~91
- 3 Harland D M. The Earth in Context: A Guide to the Solar System Chichester UK. Heidelberg: Springer-Verlag, 2001. 1~377
- 4 侯德封, 欧阳自远, 于津生. 核转变能与地球物质的演化. 北京: 科学出版社, 1974. 1~43
- 5 欧阳自远. 类地行星探测与比较研究. 见: 中国科学院地球化学研究所编. 七十年代地质地球化学进展. 贵阳: 贵州人民出版社, 1980. 70~85
- 6 欧阳自远. 地球行星的演化. 地质地球化学, 1995 (5): 1~34, 54~74
- 7 欧阳自远等. 我们只有一个地球. 郑州: 河南人民出版社, 1998. 1~53
- 8 Mumay R G *et al.* Surface history of Mercury: Implications for terrestrial planets. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**: 2 508~2 519
- 9 Grealey R. Planetary landscapes. New York: Allen & Unwin Press, 1985. 1~124
- 10 中国科学院贵阳地球化学研究所编. 月质学研究进展. 北京: 科学出版社, 1977. 1~40, 248~302
- 11 欧阳自远. 月球演化的轮廓. 地质地球化学, 1975, (8): 16~19
- 12 欧阳自远等. 月球探秘. 郑州: 海燕出版社, 2002. 1~42
- 13 Harland D M. Exploring the Moon; Texpeidion. London: Springer-Praxis 1999. 1~176
- 14 Taylor S R. Lunar Science: A Post-Apollo View. New York: Pergamon Press Inc., 1975. 1~110
- 15 Owen T *et al.* The composition of the atmosphere at the surface of Mars. *Journal of Geophysical Research*, 1977, **82**: 4 635~4 639
- 16 Matin M C, Edgett K S. Evidence for recent groundwater seepage and surface runoff on Mars. *Science*, 2000 **288**: 2 330~2 335

THE MAIN ELEMENTS OF CONSTRAINT ON THE ATMOSPHERE AND HYDROSPHERE ORIGIN AND EVOLUTION OF THE TERRESTRIAL PLANETS

Ouyang Ziyuan^{①②③} Zou Yongliao^③ Li Chunlai^③
Liu Jianzhong^③ Xu Lin^①

① *Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;* ② *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002;*
③ *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012*

Abstract

In this paper, the authors analyze the original and evolutional characteristics of the atmosphere and hydrosphere of the Mercury, Venus, Earth (including the Moon), Mars, discuss the differences of the atmosphere and hydrosphere among the Venus, Mars and the Earth. Compared with the outer planets of the solar system, the terrestrial planets have small mass and volume, high density, slow rotation, less or no satellite, low volatile element abundances, near the Sun, lost all of their original atmosphere driven by the strong solar wind during Taurus Period, combined with the frequent and heavy impacts, the present atmosphere is secondary and come from the leaving of gases in interiors. The formation and evolution of the atmosphere and hydrosphere of the terrestrial planets were controlled by their mass (representing their energy as well as the duration and intensity of tectonic activities), the distance from the sun, and other elements. Generally, among the terrestrial planets the Earth and Venus characterized by the heaviest mass, highest escape velocity, tied up much more gases which are more complicated in components and higher in density. The Mars with light mass and a velocity of no more than the half of the Earth's, the gases on its surface gradually escaped into the deep space and the atmosphere became rare. The Mercury is the lightest planet in the terrestrial planets and nearest to the sun on which not only the solar wind but also thermal motions of molecules of gases (high temperature) is strong, and the gases easily escape into the space leaving rather rare atmosphere and have the solar wind properties. The Moon has the minimum mass with almost no atmosphere and hydrosphere. Overall, the thermal history of planets, the distance from the sun and their mass puts important effects on their atmosphere and hydrosphere formation and evolution.

Key words the terrestrial planets, the atmosphere, the hydrosphere, the effecting elements