

Origin and Early Evolution of Terrestrial Planet Atmospheres and Oceans

Lin-Gun Liu

Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei Taiwan

Email: lliu@earth.sinica.edu.tw

Received: Oct. 13th, 2017; accepted: Oct. 23rd, 2017; published: Oct. 30th, 2017

Abstract

For as long as the terrestrial planets (Mercury, Venus, Earth, Moon and Mars) were accreted from planetesimals containing some carbonates and hydrous minerals, the majority of the materials that form today's terrestrial planet atmospheres and oceans should be inherent. An amount of H₂O that is roughly equivalent to today's Earth oceans should be buried inside Venus, Earth and Mars during the early stage of accretion. After accretion, the proto-atmospheres of Venus, Earth and Mars likely consisted of more than 95% CO₂ which are probably kept by both Venus and Mars till today. The fate of the Earth, on the other hand, had been changed by the Moon-forming giant impact. After the giant impact, the Earth gained its Moon and released most of its H₂O contents into the CO₂ proto-atmosphere. At such temperature and pressure conditions, H₂O and CO₂ would form a supercritical H₂O-CO₂ fluid which would later precipitate to yield the indigenous oceans when Earth's surface temperature cooled down to 450°C - 300°C. The hot indigenous ocean reacted with feldspars, the most abundant surface minerals, to form carbonates, thus removing all CO₂ from Earth's proto-atmosphere eventually. The gravity force of Mars is too small to hold gaseous H₂O in its atmosphere, but this does not necessarily imply that Mars' interior or its surface materials do not contain H₂O.

Keywords

Earth, Venus, Mercury, Mars, Moon, Atmosphere, Ocean

内行星大气海洋的成因和初期演化

刘玲根

中央研究院地球科学研究所, 台湾 台北

Email: lliu@earth.sinica.edu.tw

收稿日期: 2017年10月13日; 录用日期: 2017年10月23日; 发布日期: 2017年10月30日

摘要

只要太阳系的内行星(水星、金星、地球、月亮和火星)是由含碳酸盐矿物和含水矿物的微星物质所依附会聚而来的,内行星大气和海洋的物质主要是与生俱来的,而不是在成长后再附加上去的。在早期会聚成长中,金星、地球、火星体内应已埋藏了相当于今日地球表面的海洋水量,而它们成长后的原始大气是由大于95%的 CO_2 所组成。金星和火星至今保存着它们的原始大气,而介于两者之间的地球却因造月大撞击改变了命运。大撞击后的地球获得了月亮,大撞击也把地球体内大部分的 H_2O 气化进入原始 CO_2 大气而结合成超临界 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体。此物在地表温度冷却到摄氏450~300度之间应会凝聚依附地表形成原始海洋,高温原始海洋会与地表最多的长石作用形成碳酸盐,从而把地球原始大气中的 CO_2 悉数移入海底。火星的引力小到无法捕获气态 H_2O 分子成为它大气的一员,但火星体内和表层物质中绝对不欠缺 H_2O 的。

关键词

地球,金星,水星,火星,月亮,大气,海洋

Copyright © 2017 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

由内而外,太阳系的内行星是指水星、金星、地球、月亮和火星。在这个体系内,水(H_2O)和二氧化碳(CO_2)无庸自疑是最富含的挥发物质。水构成了地球的海洋,而金星和火星百分之九十五以上的大气是由二氧化碳组成的。在文献里,除了地球大气海洋的成因和演化探讨得比较多之外,其他内行星大气海洋的探讨就少很多了。近一、二十年里,探讨火星有无水的问题似乎相当热烈,但并没有探讨火星水的来源或成因,更遑论金星和火星的二氧化碳大气又是如何来的?本文将综合作者曾发表过有关这一方面的论文,来探讨 H_2O 和 CO_2 在内行星大气海洋的起原和初期演化所扮演的角色。

2. 行星的大气

挥发性物质是否能组成行星的大气,是由三个条件决定的:

- 1) 行星体系内外是否存在这样的挥发物质;
- 2) 星体表面的温压;
- 3) 星体的总质量(或引力)。

这第一个条件就不用多说了,星体内外若不存在某种挥发物质,此种挥发物就根本不可能成为此星球的大气(或海洋)的。这第二个的温压,是决定某物质在星体表面是否可以以气体、液体或固体状态存在的条件。

行星一旦具有某一气体物质,此气体物质是否能成为行星大气的一员,理论上说,是由行星表面大气的温度和行星的总质量(或引力)大小来决定的,就是因为表面和大气温度的动能才让大气中的气体分子跑走了的。但比起总质量(或引力)的因素,表面和大气温度的因素似乎是可以不计的,因为气体分子一离开行星表面后,气温会很快下降。当然,反过来说,若表面气体温度很低的话,即使星体总质量不大,

这些气体还是能暂时保留在大气中的。在同一气温下，分子量小的气体跑得快、容易丢失，分子量大的气体跑得慢、较易保留下来。但只要温度的存在，所有气体分子都会或多或少地由行星表面跑失了的，只要跑失的量是可以忽略不计，通常就被认同是此行星大气的一员。所以某一气体物质能否被保留成为行星大气的一员，事实上是由行星的总质量(或引力)大小来决定的。本文作者[1]把能吸附某一气体分子使其能成为行星大气一员的最小质量定义为某气体分子能组成行星大气的临界质量(见表 1)。

3. 挥发物的由来和撞击演化

假如太阳系的内行星是由原始固体微星(planetesimal)物质所依附会聚(accreted)而来的，微星物质中肯定含有极少量碳酸盐矿物(carbonates)和含水矿物(hydrous minerals)的。这些矿物在地球表面所发现的石陨(stony meteorites)中是所在多有的，所以这样的假设应是十分合理的。

在微星物质依附会聚的初始，微星物质相互撞击的引力应该不是很大的，只是相互依聚在一起而已，等到依聚体愈长愈大后，相互撞击的引力也就愈来愈大。根据对碳酸盐矿物和含水矿物的撞击高压实验的结果，我们知道碳酸盐矿物在撞击压力超过 100 仟帕时，就会释放 CO₂，超过 700 仟帕时，会释放出所有 CO₂ [2] [3] [4]。相当类似的，含水矿物也会在撞击压超过 200 仟帕时释放出 H₂O，超过 600 仟帕时释出所有 H₂O [5]。

假设太阳系的内行星是由类似的物质，经由类似的依附会聚过程而成长的话，在成长的初期，成长体和微星物质相互撞击的压力还未超过 600~700 仟帕时，成长中的内行星体内势必还存在着碳酸盐矿物和含水矿物的。依据这些实验结果，假设原始微星物中含有 0.3 wt% H₂O，本文作者[6]曾估算出，金星、地球和火星在成长过程中至少都已埋藏了相当于今日地球表面的海洋水量(~1.42 × 10²⁴ 克)。用图 1 假设

Table 1. Comparison of the lower bounds of the critical mass for various gas species with the mass of Mercury, Venus, Earth, Moon and Mars and their respective atmospheric composition and surface pressure*

表 1. 行星吸附各类气体分子的临界质量与水星、金星、地球、月亮和火星总质量对比，并附上各行星的大气组成和表面大气压*

气体分子(克分子量)	临界质量(克)	行星	总质量(克)
		月亮	7.35 × 10 ²⁵
		水星	3.30 × 10 ²⁶
			(O ₂ +Na+H ₂ +He = 10 ⁻¹⁵ 耙)
CO ₂ (44.01)	3.30 × 10 ²⁶		
Ar (39.95)	3.64 × 10 ²⁶		
O ₂ (32.00)	4.54 × 10 ²⁶		
N ₂ (28.01)	5.19 × 10 ²⁶		
CO (28.01)	5.19 × 10 ²⁶		
		火星	6.419 × 10 ²⁶
			(CO ₂ + N ₂ + Ar= 8 × 10 ⁻³ 耙)
H ₂ O (18.02)	8.06 × 10 ²⁶		
He (4.00)	3.63 × 10 ²⁷		
		金星	4.869 × 10 ²⁷
			(CO ₂ + N ₂ = 93 耙)
		地球	5.976 × 10 ²⁷
			(N ₂ + O ₂ + H ₂ O + Ar= 1.013 耙)
H ₂ (2.02)	7.19 × 10 ²⁷		

*大气组成依多寡排序，少于 1%者不计，火星和金星的 CO₂ 都大于 95%。

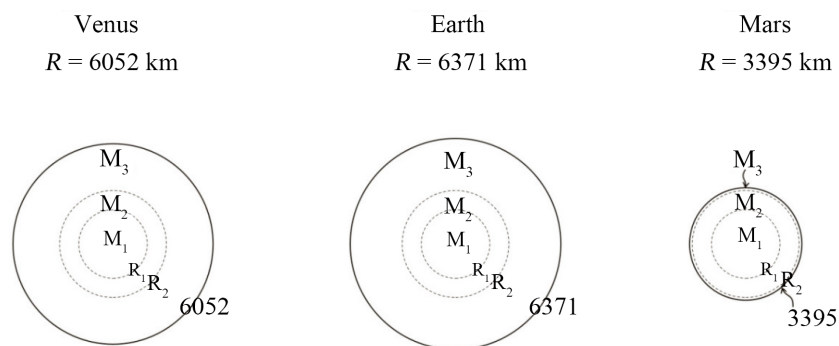


Figure 1. Imaginary internal structure of Venus, Earth and Mars during and right after accretion. R_1 is the radius at which the impact pressure reached about 600~700 kbar, and complete decarbonation and/or dehydration of the infalling planetesimals and the surface of the growing planets occurred. The mass inside R_1 is M_1 , in which both CO_2 and H_2O were buried as carbonates and hydrous minerals, respectively. The buried mass of H_2O was estimated to be 1.42×10^{24} g. Beyond R_1 released CO_2 and H_2O due to impact escaped to the outer space. R_2 is the radius beyond which the contents of CO_2 of the growing planets are frozen and the mass ($M_1 + M_2$) is greater than 3.30×10^{26} g (M_2 is the mass retained between R_1 and R_2). CO_2 is the first gas species in the proto-atmospheres and was derived from mass M_3 . In order to keep gaseous H_2O in the proto-atmosphere, ($M_1 + M_2$) must be greater than 8.06×10^{26} g. The mass of Mars is 6.419×10^{26} g. So, it is not possible for Mars to have H_2O in its atmosphere. Both R_1 and R_2 are gas species dependent and R_2 is somewhat inversely proportional to the molecular weight of gas species. For Mars, R_2 should be smaller than 3395 km for H_2O .

图 1. 假设的金星、地球和火星成长过程，各星体最外围的数字是它们的半径，以公里计。 R_1 的半径就相当于表面撞击压力达到 600~700 千巴的时候， R_1 半径内的总质量为 M_1 ， M_1 应已含有大约 1.4×10^{24} 克的 H_2O 。成长到超过 R_1 的时候，行星表面和撞击上来微星所含的 CO_2 和 H_2O 会全部释放出来，释放出的 CO_2 和 H_2O 又会逃逸到外层空间去，而且是一去不返的。等行星的半径长大到 R_2 ，而行星 $M_1 + M_2$ 的总质量已大于 3.30×10^{26} 克的时候，要外逃的 CO_2 就会被成长中的行星抓获成为它的原始大气。行星半径要长大到超过 R_2 后，才能渐次抓获其它较轻的气体分子。要抓获 H_2O 气体分子， $M_1 + M_2$ 必须大于 8.06×10^{26} 克。火星的总质量是 6.419×10^{26} 克，所以 H_2O 是不可能成为火星大气成员的。总之， R_1 和 R_2 的大小随气体不同而异，而 R_2 的大小又大致与气体分子量成反比，原始大气中的气体物质来自 M_3 。对火星而言，它 CO_2 和 N_2 的 R_2 半径都小于 3395 公里，而它 H_2O 的 R_2 半径要大于 3395 公里。

的内行星成长过程来解说， R_1 的半径就相当于表面撞击压力达到 600~700 千巴的时候， R_1 半径内成长中金星、地球和火星的质量为 M_1 ，而 M_1 中已含有大约 1.42×10^{24} 克的 H_2O 。如果水星和月亮也是经由类似的物质和过程而成长的话，它们都还未达到 R_1 半径的大小，体内也应当含有碳酸盐矿物和含水矿物的。当然，我们后面还会说到，月亮根本不是这么来的。

4. 内行星大气的演化

前面说到成长体和微星物质相互撞击的压力超过 600~700 千巴时，碳酸盐矿物中的 CO_2 和含水矿物中的 H_2O 会全部释放出来，但成长中内行星这时的质量或产生的引力尚未大到能吸附住气态的 CO_2 和 H_2O (即 M_1 尚小于表 1 中 3.30×10^{26} 克的临界质量)，所以在这一段成长过程中，这些气体就会流失到外层空间去，而且是永远去了。

内行星再继续撞击会聚成长后，其总质量(或引力)总会增大到超过图 1 中($M_1 + M_2$)的质量，成长的星体这时就会把要逃逸的 CO_2 先抓住，因为 CO_2 是自然大气中分子量最大跑得最慢的，这时成长中的内

行星就有了最原始的大气(proto-atmosphere), 所以今天金星和火星大于百分之九十五的 CO_2 大气应该是保留了它们的原始大气。本文作者[7]曾主张介于金星和火星之间的地球原始大气应该和金星火星一样, 若地球未遭遇过大灾变, 今天地球也应该具有大于百分之九十五的 CO_2 大气。

在捕获 CO_2 之后, 内行星还继续会聚成长的话, 它们会依次捕获氩(Ar)、氧(O_2)、氮(N_2)等气体成为大气的一员(见表 1), 各气体占大气中的多少, 当然是由各气体来源的多寡决定的。若内行星还能再成长的话, 它们的引力就能够大到把要逃逸的气态水分子(H_2O)捕获成为大气的一员。依据表 1 的估算, 内行星的总质量至少要大于 8.06×10^{26} 克才有可能捕获气态水分子。火星的质量是 6.419×10^{26} 克, 所以火星从来就没有够大的引力能捕获气态水分子成为它大气的一员。换一句话说, 依据表 1 的估算, 除了金星和地球外, 太阳系的其它内行星(水星、月亮和火星)大气都不可能长期存在着气态水分子的(事实的观察也是如此)。但这也不能武断地推论说水星、月亮和火星都没有水, 因为它们的内部都还可能存在着含水矿物的(见上一节的推论)。

现在矛盾的问题来了, 金星的表面和大气是滴水不存的, 而火星表面又到处显示曾经遭水浸蚀过的痕迹[8], 更何况美国太空总署(NASA)于 2008 和 2015 年在火星表面还找到水(应该是冰吧)了!

在解答矛盾之前, 我们先看看表 1 中金星和火星的大气组成。在 CO_2 之后, N_2 都是居第二多的, 此气体想必也是由微星中的硝酸盐矿物在依附会聚时撞击释放出来, 后期当金星和火星的质量成长到至少超过 5.19×10^{26} 克之后(见表 1), 被捕获成为原始大气的一员。本文主张内行星原始大气的组成和初始演化是类似的, 所以, 地球原始大气中的 CO_2 在原始海洋形成的过程中被悉数移入海底(详情见下节)后, 地球原始大气中留下来最多的气体也只能是 N_2 了, 这与今日地球大气组成相符。

5. 地球海洋的来源

要解释金星和火星的矛盾问题, 我们要先谈谈地球的海洋是如何来的。根据 Hofmeister [9]和 Abe and Matsui [10]等人的研究, 地球半径成长到大约现在 40%的情况下, 微星撞击地面所产生的温度就足以把地球表面的物质和撞击体本身熔融了。成长中的地球表面这时会被岩浆海(magma ocean)覆盖住, 在这之后的撞击已不再是固体间的相撞, 而变成固态的微星撞入液态岩浆海了。常压下, 水(H_2O)在岩浆中的溶解度是很小的, 但随着压力的增加, 溶解度会很快地加大。根据许多高压实验的结果, 本文作者[11]归纳发现在约 3 仟巴的压力下, 水在各种硅酸岩浆中的溶解度达 6 wt%, 而且随压力的增加还会增大。 CO_2 在各种硅酸岩浆中的溶解度也是很小的, 但与 H_2O 不同的是, CO_2 的溶解度并没有随压力的增大而改变。

依据上面的论述, 我们可以说, 在地球成长过程中, 当微星撞击岩浆海时, 微星会深入高温高压的岩浆海中, 微星此时释放出来的 H_2O 会溶入岩浆海, 释放出来的 CO_2 会逃入原始大气中。等地球依附会聚成长停止, 表面开始固化后, 地球是被原始 CO_2 大气包围的, 而绝大部分的 H_2O 会溶在内部的岩浆中, 这些 H_2O 只能等岩浆海全部固化后才能逃逸进入 CO_2 的大气中[7]。

虽然这些研究和论述都是针对地球而来的, 但其结论和后果应该也能适用在金星和火星的, 因为它们的半径都已大于地球半径的 40%。如此说来, 我们就能把金星现状无水的矛盾解说清楚了。无论过去或现在, 金星外表和内里的温度都比地球高许多(至少大于摄氏 400 度以上吧), 所以金星很可能是一颗尚未完全固化的行星, 它大部分的 H_2O 都还溶在内部的岩浆中[12]。

那地球原始的 CO_2 大气又怎么不见的呢?即使地球比金星可能更早完全固化, 并把大部分岩浆海中的 H_2O 慢慢释放到 CO_2 的大气中, 那今天地球的大气仍然应含有相当多的 CO_2 才对, 因为在温压条件不大的情况下, H_2O 和 CO_2 是完全相互不溶的物质[7]。不过, 地球的命运完全不同于金星和火星的地方, 在于初始的数百万年里, 地球尚未完全固化时, 遭遇了一颗相当于今天火星大小的星球撞击, 这就是所谓的“造月大撞击” [13] [14]。在这次的大撞击下, 地球不但获得了它的月亮, 还把大部分存在体内的含水

矿物和未固化岩浆中的 H_2O 全部气化进入原始的 CO_2 大气中。本文作者[7]曾为文论述高温高压下 H_2O 和 CO_2 在大气中的相互作用，它们首先结合成超临界的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体。当地表温度冷却到摄氏 450~300 度之间时，超临界 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体会凝聚依附地表形成地球原始的海洋，所以原始海洋是相当高温的，在如此高温的超临界 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 海洋底下，富含 CO_2 的海水很快就能和地表上最多的长石矿物起化学反应，并产生碳酸盐矿物和含水黏土矿物(万物真的是从那里来到那里去)沉淀在海底。因为 CO_2 不断地从超临界的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 海洋底下移失，为了保持平衡，原始大气中的 CO_2 就得不断地溶入海水，这样原始的 CO_2 大气也就很快消失殆尽，代之以 H_2O 的大气和 H_2O 的海洋，高空中的气态 H_2O 分子会不断分解成氧和氢，而后者会流失到外层空间去。如果这个学说接近事实的话，未来人类如能取得或观察到大量金星和火星表面的物质时，应该不会发现像地球表面那么多的碳酸盐矿物才对！

近年来天文物理学者[15] [16]主张，海洋是在地球成长后，由外层空间的脏雪球撞击地球而形成的，此主张很难说清楚为何金星是滴水不存的?而火星的水又去了那里?脏雪球应该没长眼睛只找地球撞击吧!再有，内行星表面丰沛的 CO_2 又来自何处?本文作者认为这是一种比较偏颇和无法概全的主张。当然，有一小部分地球的水，也极有可能来自这些脏雪球的。

6. 火星、水星和月亮的水

剩下来我们还有火星的水的矛盾问题尚未解释。依据表 1 的推算数据，本文作者[1] [12]早已说过火星以及更小的水星和月亮的质量都太小，所以它们的引力都不足以抓住气态 H_2O 分子成为它们大气的一员。事实上，水星和月亮的质量是小到连分子量最大的 CO_2 分子都无法抓住的(见表 1)，这可由水星的大气压约 10^{-15} 巴可见证，这样的气压已比绝大多数实验室里能达到的真空还真空，所以水星和月亮是没有大气和水的。当然，我们不是说它们体内也不含 H_2O 或 CO_2 ，而正好相反，它们体内应当还含有碳酸盐矿物和含水矿物的。

近世人类对火星水的问题，从来就没失焦过。上世纪里从地球上观察，这世纪里直接上去采样，在在证明火星是有水的，而且极有可能过去还存在过大量的水或说海洋吧！本文作者着文估计过[6]，火星在成长的早期极有可能已埋藏了相当于今天地球表面海洋的水量($\sim 1.4 \times 10^{24}$ 克)。

火星是内行星中距太阳最远的(也就是最冷的)，其总质量相对于金星和地球也小了许多，所以火星成长时外围薄薄的岩浆海应该早已完全固化。固化时或固化后，岩浆海或原本的含水矿物中的一些 H_2O 应该要释放出来进入大气或直接以液态水渗出(degassing)表面，如果火星表面此时已经够冷的话。大气中的 H_2O 分子既会逃逸到外层空间去，又会凝固成冰而积存成海洋，就看孰快孰慢。火星半径只有地球半径的 0.53，并不需要太多的水，就能生成相当深的海洋(只要约地球 11% 的海水量 1.5×10^{23} 克就能在火星表面形成一个平均 1000 公尺深的海洋圈)。因为火星的引力根本是抓不住气态 H_2O 分子的，日长天久，所有表面的 H_2O 都会消失殆尽。

火星有水，正好证明了火星的水是与生俱来的。火星的水根本不可能是在火星成长后，再由脏雪球撞击火星而来的，因为脏雪球中的冰在撞击火星后肯定全会气化成 H_2O 分子，而火星的引力又抓不住它们，气态 H_2O 分子只能逃逸到外层空间去。如果火星的水是与生俱来的，那我们实在也没有太多理由相信地球的水主要是由脏雪球撞击地球而来的。

7. 结论

因为总质量和引力太小，内行星中的水星连最大分子量的 CO_2 气体分子都无法抓获成为它的大气，所以，水星实质上是没有大气的。金星、地球和火星的原始大气都由大于百分之九十五的 CO_2 组成，金星和火星至今仍保留了它们的原始大气，而地球因为造月大撞击改变了它的命运。大撞击后的地球获得

了月亮, 大撞击也把地球体内大部分的 H_2O 气化进入原始 CO_2 大气结合而成超临界的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 流体, 此物在地表温度冷却到摄氏 450~300 度之间应会凝聚依附地表形成原始海洋。高温超临界的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 海洋很快会与海底最多的长石矿物作用产生碳酸盐和含水黏土矿物。如此地球原始大气中的 CO_2 将悉数移入海底形成碳酸盐矿物, 而代之以 H_2O 的大气和 H_2O 的海洋。高空中的气态 H_2O 分子会不断分解成氧和氢, 而后者会流失到外层空间去。火星的质量和引力虽然可以捕获 CO_2 、Ar 和 N_2 等气体成为它的大气, 但却无力捕获气态 H_2O 分子成为它大气的一员, 但火星体内和表层物质中绝对不欠缺 H_2O 的。

参考文献 (References)

- [1] Liu, L. (2014) Critical Masses for Terrestrial Planet Atmospheric Gas Species and Water in/on Mars. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **25**, 703-707. [https://doi.org/10.3319/TAO.2014.04.11.01\(T\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2014.04.11.01(T))
- [2] Boslough, M.B., Ahrens, T.J., Vizgirda, J., Becker, R.H. and Epstein, S. (1982) Shock-Induced Devolatilization of Calcite. *Earth and Planetary Science Letters*, **61**, 166-170. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90049-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90049-8)
- [3] Kotra, R.K., See, T.H., Gibson, E.K., Horz, F., Cintala, M.J. and Schmidt, R.S. (1983) Carbon Dioxide Loss in Experimentally Shocked Calcite and Limestone (Abstract). *Lunar and Planetary Science*, **14**, 401-402.
- [4] Lange, M.A. and Ahrens, T.J. (1986) Shock-Induced CO_2 Loss from CaCO_3 ; Implications for Early Planetary Atmosphere. *Earth and Planetary Science Letters*, **77**, 409-418. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(86\)90150-0](https://doi.org/10.1016/0012-821X(86)90150-0)
- [5] Lange, M.A. and Ahrens, T.J. (1984) FeO and H_2O and the Homogenous Accretion of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, **71**, 111-119. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(84\)90057-8](https://doi.org/10.1016/0012-821X(84)90057-8)
- [6] Liu, L. (1988) Water in Terrestrial Planets and the Moon. *Icarus*, **74**, 98-107. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(88\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0019-1035(88)90032-2)
- [7] Liu, L. (2004) The Inception of the Oceans and CO_2 Atmosphere in the Early History of the Earth. *Earth and Planetary Science Letters*, **227**, 179-184. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.09.006>
- [8] Carr, M.H. (1986) Mars: A Water-Rich Planet? *Icarus*, **68**, 187-216. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(86\)90019-9](https://doi.org/10.1016/0019-1035(86)90019-9)
- [9] Hofmeister, A.M. (1983) Effect of a Hadean Terrestrial Magma Ocean on Crust and Mantle Evolution. *Journal of Geophysical Research*, **88**, 4963-4983. <https://doi.org/10.1029/JB088iB06p04963>
- [10] Abe, Y. and Matsui, T. (1985) The Formation of an Impact-Generated H_2O Atmosphere and Its Implication for the Early Thermal History of the Earth. *Journal of Geophysical Research*, **90**, C545-C559. <https://doi.org/10.1029/JB090iS02p0C545>
- [11] Liu, L. (1987) Effects of H_2O on the Phase Behaviour of the Forsterite-Enstatite System at High Pressures and Temperatures and Implications for the Earth. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, **49**, 142-167. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(87\)90138-5](https://doi.org/10.1016/0031-9201(87)90138-5)
- [12] Liu, L. (2009) Origin and Early Evolution of the Atmospheres and Oceans on the Terrestrial Planets. In: Denis, J.H. and Aldridge, P.D., Eds., *Space Exploration Research*, Nova, N.Y., 385-400.
- [13] Benz, W., Slattery, W. L. and Cameron, A. G. W. (1986) The Origin of the Moon and the Single-Impact Hypothesis I. *Icarus*, **66**, 515-535. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(86\)90088-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(86)90088-6)
- [14] Benz, W., Slattery, W.L. and Cameron, A.G.W. (1987) The Origin of the Moon and the Single-Impact Hypothesis II. *Icarus*, **71**, 30-45. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(87\)90160-6](https://doi.org/10.1016/0019-1035(87)90160-6)
- [15] Frank, L.A., Sigwarth, J.B. and Craven, J.D. (1986) On the Influx of Small Comets into the Earth's Upper Atmosphere. I. Observations. *Geophysical Research Letters*, **13**, 303-306. <https://doi.org/10.1029/GL013i004p00303>
- [16] Frank, L.A., Sigwarth, J.B. and Craven, J.D. (1986b) On the Influx of Small Comets into the Earth's Upper Atmosphere. II. Interpretation. *Geophysical Research Letters*, **13**, 307-310. <https://doi.org/10.1029/GL013i004p00307>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2325-2286，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：aas@hanspub.org