

〔法〕帕斯卡尔·阿科特 著 学林出版社

气候的历史

——从宇宙大爆炸到气候灾难

图书在版编目(CIP)数据

气候的历史：从宇宙大爆炸到气候灾难/(法)阿科特著；李孝琴等译. —上海：学林出版社，2011.8
ISBN 978-7-5486-0211-8

I. ①气… II. ①阿… ②李… III. ①全球气候变暖—研究 IV. ①P461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 156801 号

著作权合同登记号 图字：09-2010-777 号

© Perrin 2003



气候的历史——从宇宙大爆炸到气候灾难

作 者——[法] 帕斯卡尔·阿科特

译 者——李孝琴 等

责任编辑——叶 刚

封面设计——周剑峰

出 版——上海世纪出版股份有限公司

学林出版社(上海钦州南路 81 号 3 楼)

电话：64515005 传真：64515005

发 行——上海世纪出版股份有限公司发行中心

(上海福建中路 193 号 www.ewen.cc)

照 排——南京展望文化发展有限公司

刷 印——上海展强印刷有限公司

开 本——890×1240 1/32

印 张——9.5

版 次——2011 年 8 月第 1 版

2011 年 8 月第 1 次印刷

书 号——ISBN 978-7-5486-0211-8/C·11

定 价——30.00 元

(如发生印刷、装订质量问题，读者可向工厂调换。)

目 录 |

引言	1
第一部分 从地球的形成到人类的出现	9
第一节 时间的迷雾	9
第二节 生命造就气候	22
第三节 恐龙的灭亡	41
第四节 老鼠与人类	60
第二部分 当气候遇见历史	86
第五节 地里劳作的人	86
第六节 气候决定论	107
第七节 动荡的小冰河期	122
第八节 长冬之谜	141
第九节 20 世纪的大动乱	159
第三部分 全球变暖问题	182
第十节 重建过去的气候	182
第十一节 气候地理	196

第十二节 人类与气候·····	211
第十三节 科学和政治间的气候变化·····	245
结语·····	268
附录·····	275
参考文献·····	280
致谢·····	298
译后记·····	299

引言

20 亿年前,一种极光曾经笼罩着我们的星球长达几十万年之久。当时的太阳光比现在要弱得多,一些人甚至认为地球本来是完全被冰层覆盖的。就像在高山地区的一些冬天的黎明一样,那时的天空永远都是淡紫色?日落时是金黄色?还是像如今的火星上面一样是淡红色?当时那里有云吗?有在广阔的浮冰上呼啸的风吗?事实上,我们知道得并不确切:我们用以再现上溯到蒙昧时代的气候状况的可用资料并不多。

然而我们知道的是,很早以前,在地球的形成时期和第一冰川期之间,也就是大约 46 亿年前,地球的气温平均来说比现在要热,当时可能存在着大量的云团。也正是在这一时期,大约 38 亿年前,最早的微生物出现了。

古地球的气候状况有它自己的历史。关于这个历史的复原,以及一些重大变化的原因和预测的研究,构成了一门科学学科——气候学,即关于气候的科学研究。气候^①一词,指特定地点或整个地球在特定时期内所有的大气状态(温度、风、降雨量、日照、湿度等)。气象学(来源于希腊语 *meteōros* 一词)是一门应用于天气预报的关于气候的科学。气候学是一门较新的学

^① 气候(*climat*): 源自拉丁语 *clima*, *-atis*, 希腊语 *klima*, 意为“倾角”(某一地点的垂线与赤道面的夹角,也就是太阳光线与地球的夹角)。

科,因为气候条件并非一直和今天一样的这种思想是在相当近的时期才建立起来的:没有档案,对此人类的记忆最多能上溯到两或三代,这对于以精确的方式推进关于长期的规律性变化的假设来说无疑太短了。由于一些表面上与那些重大趋势相反的现象可能会突然出现,这样,1956 到 1962 年欧洲出现的特别酷热的冬天也属于在我们如今仍然存在的全球变暖的范围之内。

18 世纪时,一些古生物学者,如布丰(Buffon, 1707—1788)等公布了一些关于热带动物(如大象、犀牛等)曾经在欧洲和北美洲北部生存过的证据,才使得气候曾经发生过重大变化的想法开始有所发展。我们如今一直观察岩层中各种类型的大型反石块,也就是“漂石”,同样也在这一发展中起过重要的作用。最初在汝拉山脉和阿尔卑斯山脉发现它们时,我们一开始把它们解释成了洪积的结果。19 世纪时,科学家们才发现,其实是从前一直覆盖着那些山区的巨型冰盖使它们脱离了本来的位置,然后又在冰川融化时将它们留在了那里。

气候学对于人类的发展,甚至是人类的生存来说,都是一门关键的学科,因为生物史从一开始就与气候史有着紧密的联系:气候的变化对于生物进化和生物多样性起着重要的作用;同样地,生物对于原始大气的极度变化也作出了很大的贡献。这样,气候学家发现,一些能够直接利用二氧化碳并释放氧气的生物(细菌和蓝藻)的出现和发展很早就改变了大气的化学组成成分。

同样地,科学家们也注意到,过去动物群的大灭绝与一些突然出现的气候骤变之间有着强烈的相关性:在著名的白垩纪—第三纪(距今约 6 500 万年)灾难中,相当一部分的中生代大型爬行动物(包括恐龙)灭绝了。这次灾难很有可能是由一次骤然

降温引起的,尽管对于这次降温的确切原因还存在争议:是彗星“杀手”?是灾难性的火山运动中巨型熔岩层以两公里的厚度覆盖了部分的印度次大陆?还是两者同时存在?

一直以来,一些气候变化的重复性特点都是摆在专家面前的严峻难题。最让他们困惑的是,一些重大的周期性变化中常常重叠着另一些更常出现的周期性变化,比如在第三纪和第四纪的过渡时期中相继而来的冰期。仅仅几十年前,我们才用塞尔维亚数学家米鲁丁·米兰科维奇(Milutin Milankovitch)的行星理论解释了这一现象。当然,这也要归功于我们对于可用数据更精确的阐释和信息科学方法的飞跃,使得一些极其复杂的模型成为可能。

如果说地质资料的相对不足让我们很难再现地球的原始气候,那么近期气候演变的征兆还是很多的。不仅如此,自从历史学家、如今法兰西大学的教授艾玛纽埃尔·勒鲁瓦·拉迪里(Emmanuel Le Roy Ladurie)将很多人的注意力吸引到其中一些征兆上之后,有时候甚至外行人都可以很容易地找到它们。这样,自16世纪开始,大量的远古雕刻都证明了阿尔卑斯山脉冰川的后退。每年,当成千上万的游客从沙莫尼山谷(Chamonix)附近的蒙坦威尔车站凝视冰河时,他们可以看到,欧洲在1590到1850年“小冰川期”的冰川最上限比当前水平超出了十多米。事实上,自中生代以来,我们对于古代气候的了解相对比较确切,而且越接近现代,这种确切度就越高。

正因如此,我们掌握的数据使我们能够理解为什么东非在第三纪末突然发生了那次重大的环境变化。这次变化可能对我们星球的历史产生了重大的影响,因为它对人类的起源也可能起到了不可忽略的作用。实际上,在这段时期内,最初的茂密树丛已经变成了草原,这同时也迫使人科(Hominidae)的群体慢

慢地放弃了树栖的生活方式。人科包括南方古猿,也就是人类的祖先,本身也属于人属,由古生物学者伊夫·科庞(Yves Coppens)、汤姆·格雷(Tom Gray)和唐纳德·约翰逊(Donald Johansson)发现的著名的露西(Lucy)就是其中之一。为了能够俯视那些较高的植物,他们需要经常采用两足的行为,这种行为可能逐渐导致了这个群体前肢的解放——从此以后,前肢就更常用来做一些其他的活动,而不仅仅是移动。众多人种起源方面的专家都认为,几千年来,手、脑、工具之间相互关系的不断发展可能对“能人”,也就是能够使用双手的人(我们认为最早经证实的工具就是“能人”使用的)的出现起到了很大的作用。

在历史有记载的时期中,气候和人类历史的联结关系已经不容置疑。正如我们将要看到的,如果说气候变化没法决定历史事件,那么它们至少也在其中扮演了一个重要的角色:今天我们相信,新石器时代(距今 6 000 年)最佳状态的温度使得农业能够在这块从巴勒斯坦南部一直延伸到美索不达米亚平原、被历史学家们命名为“肥腴新月”(Croissant fertile)的土地上产生和发展起来。同样地,我们也可以认为,如果没有开始于约公元前 900 年、在 1200 年达到顶点并持续了大约一个世纪的那样一个漫长的温和气候期,13 世纪温带的欧洲就绝不会出现耕地面积的显著扩展。

最终,这又使得我们刚刚提到的联结关系更加紧密了。因为从那以后我们就了解到,人类活动极大地改变了大气的化学组成成分,这样就扰乱了地球的气温调节机制,从而也给 21 世纪留下了很多令人担忧的问题。

然而,我们还是应该保持理智:没有什么比气候决定论更违背历史前进步伐的了。早在 1922 年,历史学家兼地理学家吕西安·费夫尔(Lucien Febvre, 1878—1956)就在他的《地理环

境与人类进化》(*La Terre et l'évolution humaine*)一书中以副标题“关于历史的地理引言”(Introduction géographique à l'histoire)为这一观点指明了方向。受法国人类地理学奠基人保罗·维达尔(Paul Vidal de La Blache)的启发,他在书中抛弃了决定论的说法而转向了可能论(possibilisme)。在人类地理学上,可能论是吕西安·费夫尔从一句名言中总结出来的一种精神状态,这句名言就是“无处必需,则处处可能”(Des nécessités nulle part; des possibilités partout)。关于这一点我们有很多要说,至于地理学家乔治·贝特朗(Georges Bertrand)在一篇苛刻的批评中认为它是放纵主义的科学外衣就另当别论了。在这一点上,吕西安·费夫尔对查尔斯·孟德斯鸠(Charles de Montesquieu, 1689—1755)关于气候学说的分析是相当有说服力的——当然我们所说的是一个分析,因为作为一位真正的历史学家,他否认自己从其所属时代的高度对孟德斯鸠的气候学说作出了一个评论。他在分析中引用了这位《论法的精神》(*De l'esprit des lois*)的作者写的这样一段话:“非洲和亚洲南部的气候相同,而它们也处于同样的奴役束缚中”,并试图将这种相对初级的观点同亚里士多德在其著作《政治学》第七卷中表达的观点进行比较。亚里士多德在书中写到:“寒冷地区的居民富有勇气,是为自由而生的。亚洲人缺乏精力,所以注定被专制和奴役^①。”然而出于找到一个原因的需要,决定论可能被我们夸大其词了。正如《论法的精神》第十四卷第三章“南方一些民族性格中的矛盾”(其他很多章节中也有)中的这段所表明的一样:“古罗马时代,北欧人的生活中没有艺术,没有教育,也几乎没有法律;然而,仅仅凭着对气候粗浅的感情,他们就保持了一种令人敬佩的智慧,去对抗

① 吕西安·费夫尔,《地理环境和人类进化》,1922年。

罗马势力,直到他们从森林中走出来并将其摧毁。”^①

无论如何,这本书中一旦遇到关于气候和人类社会的关系的问题,都需要我们用更谨慎的态度来对待:气候变化的重要程度将被控制在一种合适的限度。除非特殊情况,否则绝不会将短期天气用来解释气候本身。相反,更大的注意力应当集中在长期的气候变化上,尤其是史前史,那时候环境的人工化和动物的驯化还没有像有历史记载的时期那样已经将人类从气候的偶然性中解放出来。

最基本的一点就是对于久远年代的测定存在不确定性。有时候,我们可以合理地推定一个叉骨的年代;但是如果不能准确推定年代,读者就只能将给出的数字当作一个粗略的估计,这可能是由于测定方法在物质上的限制,也可能是由于对那些既定年代的科学修正。此外,让气候学家们感兴趣的是那些“周期”,因为这对他们来讲代表着某种“过程”。然而,应该清楚的是,目前有两大种类的年代推算方法,而且对于一些年代较近的时期的推算,不同的方法可能得出不同的结果。

编年史可以是相对的,例如,某一物体与其他物体的位置与时间,可能只是相比较而言暂时更具说服力。整个 19 世纪唯一为人熟知的地层学所采用的方法就是如此:尽管在这一学科中随时随地都应保持谨慎,我们仍然可以认为被覆盖的沉积物比覆盖它的地层要久远。

同时,编年史也可以是绝对的:如此,与当前含碳物质(按惯例取公元 1950 年)中碳 14 的放射性相比较而言,我们想了解的具体年代的含碳物质中碳 14 的放射性就可以是精确的,因为我们知道,碳 14 的放射性每 5 730 年降低一半。我们将看到,

① 吕西安·费夫尔,《地理环境和人类进化》,1922 年。

还有其他方法可以进行放射性元素原子核的自然裂变：铀—铅法($U^{238}-Pb^{206}$)就是其中的一种，因为铅是天然铀裂变的最终产物——铀的裂变期，也就是它缩小一半的放射性所需要的时间是 44.7 亿年。当然还有很多其他的方法，比如铀—钍法($U-Th$)和著名的钾—氩法($K-Ar$)。

另一种绝对的年代测定法是树木年代学^①：研究树木生长年轮的学说。众所周知，树木在冬天和夏天的生长速度是不一样的，它们长出的细胞颜色也不一样。因此，通过年轮交叠的顺序可以确定树木年代学的系列，并能以此为基础回溯到每棵树的时间上。

那么这里出现的问题是，这两种绝对的年代测定法(碳 14 测年法和树木年代学测年法)不一定完全相符！事实上，随着时间的变化，大气的自然放射性和地球表面是不断变化的。用“太阳梯度法(树木年代学的别称)”改正放射性碳测年法得到的数据是可能的：这样我们得到的数据就是已校准数据。在校准已经成为可能的年代相对较近的时期，只有在接近 5 200 BP: Before Present, 指：从 1950 年起以前的放射性碳年数时误差会比较大(当时达到了 800 年!)。因此，除非是特殊需要，本书给出的大部分关于日期的数据都没有经过校准。最后，按照惯例，碳 14 时间表中没有被校准的日期用 BP 标明，已经校准的日期按照我们的公元历法来定位(公元前和公元后)。这几个标注就足以说明研究古代气候学的困难、争论和不确定性，尤其是那些标志着有关生命与气候联结关系的科学研究方法的困难、争论和不确定性。

本书的目标在于对所有的这些问题做一个总结。首先描述

① 树木年代学(dendrochronologie)：源于希腊语 *Dendron*，意为“树”。

我们所了解的从最早时期直到今天的气候；然后试图大致预见一些可能出现的变化。在描述的过程中，本书将会涉及推测、假设和确实性的区分，以及大众传媒中出现的灾变说与不经思考的乐观主义之间的区别——所有这些对于思考并作出必要的决定都是有害的。2003年夏天在法国造成极大损失并使法国沉浸在悲伤中的那场酷热，就是气候状况没有得到很好的理解和处理的一个典型例子：一部分人认为这次酷热是灾难性的、史无前例的，这样就排除了卫生部门的责任；对于其他人来说，这不过是一个虽不常出现但终究是稀松平常的事件，这也就使卫生部成了这场悲剧的直接责任人！我们的结论是，少一点华丽的研究而多一点客观冷静的思考，这本来真的可以让我们更有效率地对抗这场气候灾害造成的惨痛后果，而且我们完全可以相信，这种气候灾害在今后的几十年里可能再次出现。希望本书能帮助读者清晰地看到气候问题对于人类和所有生物物种所起的关键作用。

第一部分

从地球的形成到人类的出现

第一节 时间的迷雾

几年前,在带着一些孩子参观位于法国佩里戈尔(Périgord)、靠近莱斯·埃泽斯小城(Eyzies)的史前洞穴时,我会特意让他们留心观察里面那些壮美的岩画。而在那之前我就已经做了一个类比,我把外面那条长达 400 米的省道比作曾经将当代与旧石器时代^①早期所分割开来的那 4 万年。这样的话,每 1 米就代表一个世纪。一边朝着“当代”前进,我会一边为他们解释。当走到最后 20 米时,我说,这就代表着最后的两千年,也就是在我们之前的这两千年。小朋友们对于历史知识知之甚少,他们对此感到惊愕不已,也让我意识到,他们对于在我们之前那么长的历史还无法理解。他们还无法理解我一路上所给出的路标指示,这些知识对他们来说可能太新了,而讲解又太快了。

^① 旧石器时代(Paléolithique):“*paleo*”和“*lithos*”均来源于希腊语,分别表示“古的”与“石头”,即“古老石头的年代”,它是第四纪的第一个代,以约 200 万年前的更新世为开端(更新世中的“*pleistos*”和“*kainos*”亦来自于希腊语,表示“众多”与“新的,最近的”),一直延续到约 1.1 万年前旧石器时代早期的末尾、中石器时代的开端之时。“旧石器时代”一词是由英国银行家、自然学家、考古学家约翰·卢伯克(John Lubbock)于 1865 年明确定义的。

而当我们努力想要论证几亿年前的气候变化历史时,我们面临的是同样的情形。比起我们已有的迹象证据,困难要大得多,尤其是针对早期的年代,我们对于它们的了解远没有对近代了解得多。这样的话,对于古时候地球气候的研究似乎必须要求人们发挥想象力了。然而,这样的努力也只会让人晕头转向。假设我们继续采用在莱斯·埃泽斯小城用过的类比法,用1米来代表一个世纪,那么要行进到第一纪的最开始,我们要走5 400千米(原文为54千米)的路,也就是整整5.4亿年!而且,从地质的角度来讲,这段时间还算短的。这一时期也被称为显生宙^①,因为同在它之前的前寒武纪时代相比,所能发现的活化石^②已经足以说明这个时代的特征了。大多数专家都认为地球产生于46亿年前。这样前寒武纪^③就持续了长达40多亿年。再从莱斯·埃泽斯通道的角度来看,也就是说,继续根据路程上每1米来代替100年来看,必须要走大约46 000千米(原文为460千米)才能离开寒武纪到达地球形成的时刻,还必须知道,离现在的时间越远,我们所能作出的年代推断只会越不精确。至于前寒武纪,有一些还不太明确的冲积扇能够展现好几亿年的状况。

即使是采用最经典的类比方法,这些久远的年代要理解起

① 显生宙(Phanérozoïque): 来自希腊语的 *phanairos* 与 *zoon*, 分别表示明显的、显著的及鲜活的、生动的。出土于这个时期的贝壳化石使得这时期的年代划分成为可能,也使得之后对于稍不明确的年代推断成为了可能。显生宙一词 *Phanérozoïque* 与显花植物 *Phanérogames* (字面意思即生殖器官显露出来) 有同样的词根,后者就是指长有花朵的植被。

② 化石(fossile): 来源于拉丁语 *fodere*, 意为挖掘, 挖凿, 起初用于所有埋藏在土地中的异物, 如发现的史前的斧头、水晶、鱼类化石的牙、其他的真正的化石, 等等。化石现在的含义指被埋藏在沉积物中的有机体, 因为沉积物慢慢地变成了岩石, 而有机体的原始骨骼结构也就这样不受损害地被保存了下来。

③ 前寒武纪(*précambrien*): 在古生代的第一个纪——寒武纪之前的地质时代, 为英国威尔士的拉丁语名称, 时为加勒国的坎布雷斯地区。

来仍然是很困难的。因此,我们常常把这段极其漫长的时期比作地球上的1年:假设地球在这年的1月1日凌晨产生,那么最早的生物就是在这年的5月出现,而前寒武纪时代直到11月11日结束,古石器时代早期于12月31日午夜前6分30秒开始,而我们的时代,也就是公元元年,则是在午夜前20秒时才开始的!在这个类比中,一秒的时间就代表了一个世纪。但是即使是这样的一个类比,要理解起来还是不容易的。

这样的理解困难诚然令人困惑,但是从科学的观点来看,关于年代划分的不精确特征却不那么令人困惑:这也是为什么它们总是在被修改。而问题尤其在于,地质学家们不能采用多种方法来证实那些时间的标志。随着时间的推移,海洋沉积物在海洋底部沉淀,形成了一些层次,即“地层”,就像千层糕一样。因此,我们所说的“地层学”也就是对于古代大海、大洋底部各层沉积物的研究。很容易理解的是,因为组成沉积物的颗粒种类不同,沉积的速度也有所不同。原因在于,颗粒的不同会造成不同深度的地层及不同速度的沉积,而这些可以帮助评判沉积持续的时间。这些评判就构成了我们所称的“年代地层学”。而“生物地层学”,即对在各地层中发现的生物化石的研究,能够帮助再现过去的气候状况。事实上,如果从前的动物群相互不同的话,那么它们所处的生态^①条件也是不同的。气候是环境的一个重要因素。最后,沉积状况的再现也可以提供有益的古生态学证据,而它本身从气候方面来讲也具有重大意义。

国际地层委员会(Commission internationale de stratigraphie)的职责之一是对有关改变国际地层分级标准的主张进行确认或

^① 生态学(Ecologie):来自希腊语 *oikos*,意为住宅,房屋,而“*logos*”则意为说法,理由,论据。这门学科是对可以追溯到亚里士多德时代一些古老观察的继承,在19世纪被确定为生物学的一个分支,本书中将会多次出现此概念。

否决。同时,他们也负责选择术语、确认层型,并考虑这些地层的露头是否能较好地显示相应地层的特征,然后用当地的地名来命名各个时代,以作为界限,如寒武纪、杜内阶、莫斯科阶、布拉格阶等。但有时也会采用其他方式,比如说到中生代^①时,白垩纪这个词就来源于拉丁词“creta”,表示“白垩”的意思。

放射性年代学以对岩石中出现的一些放射性同位素^②的裂变研究为基础,可以确定年代地层学中的年代界限。放射性碳年代测定法仅能用来确定早至 4.5 万年前的年代。用得最多的测定方法是钾—氩年代测定法,即对岩石中的钾到氩的裂变进行测量。在地层间界限的古老性导致不确定性增加的情况下,这两种元素之间的关系可以帮助确定绝对年限。不过,这种操作只有在地层未受到大气中氩的污染时才能实行。因此,不难理解为什么地质时间界限的确定会出现频繁的改动,而有时这些改动也只是习惯使然,如尽管有着科学的依据,但是按照惯例我们认为地球大约是在 46 亿年前诞生的,误差应为往前或往后推 2 000 年左右。

原始地球

1755 年,哲学家伊曼努尔·康德(Emmanuel Kant, 1724—1804)在其著作《天体论》^③中写道,“我认为所有组成太阳系的

① 中生代(Mésozoïque): 来自希腊语 *mesos* 和 *zōon*, 分别表示环境及动物。它是显生宙的第二个代,在古生代与新生代之间。古生代的动物群属于古老动物,新生代的动物群属于新近动物,而中生代代表着处于古生代与新生代之间的动物群。此后,拥有同一词源的词语就像本词一样,根据其所展示的特征以当地的地名命名。

② 同位素(Isotopes): 来自希腊语的 *isos* 及 *topos*, 分别表示同等的及次序,地点,即具有同样原子(即在门捷列夫的元素周期律中处于同样位置)但原子数量不尽相同的简单化合物。

③ 康德(Kant),《天体论》,1755 年。

星球——包括所有的行星和彗星——的物质,即处于原始混沌状态的分散物质微粒,从太阳系产生时就充满了整个宇宙,现在它们以已经形成的星体形式在太阳系中运转。”康德关于太阳系起源的星云假说在他那个时代具有开拓性质。现在这个假设已经被普遍接受。早在笛卡儿(Descartes, 1596—1650)时就已提出太阳与其他行星起源相同的说法,但遭到了天文学家拉普拉斯(Pierre-Simon de Laplace, 1749—1827)的驳斥。这个理论反对太阳系是由于太阳与另一天体之间碰撞而形成的观点,而主张,正是由于这场灾难,从太阳中剥离出来的物质才组成了其他的行星。布丰(Buffon, 1707—1788)特别阐明了后一理论,并以一颗彗星为例加以说明。天文物理学家詹姆斯·金斯(James Jeans, 1877—1946)与哈罗德·杰弗里斯(Harold Jeffreys, 1891—1989)分别在1916年和1918年发表了一颗恒星极其靠近太阳运行的假设。

根据今天的天文物理学家们对于目前正在形成的恒星的观察,人们认为太阳是从一团旋转的星际气体中诞生的,形成的“原始太阳恒星^①”开始溃缩,接着,由于万有引力的作用,压缩达到非常高的密度,同时温度又大大增高,这样,200 万年后达到了天文物理学家们所称的“热核状态”,也就是今天我们所知的太阳所处的状态。

行星来源于围绕在太阳周围的原始星云。现在还不可能确定地说明,但是人们认为它们是由温度极高的气体及星尘所构成的。石质^②行星的形成机制非常复杂。最先是万有引力的作

① Proto-: 来自希腊语 *prōtos*,意为原始的。

② 石质(*tellurique*): 来自拉丁语 *tellus* 和 *-uris*,本身是“土地”的意思。它代表着其他同地球、火星、金星一样具有较稀薄大气且中心温度较低的行星,如巨星,尤其是木星和土星。