

编制地球的“万年历”

汪品先

中国科学院院士, 同济大学海洋地质国家重点实验室, 上海 200092

关键词 时间 天文年代表 轨道驱动 偏心率长周期

几百年来,人类在时间的概念和计时的方法上都取得了极大的进步,成功地将天文计时和物理计时结合起来使用;然而,在地质时间尺度上,至今缺乏统一的天文计时标准。为研究地球系统的历史变迁,迫切需要在日、月、年之上,在地球运行轨道的参数中,寻找更长时间的天文周期,为编制地质年代的“万年历”使用。研究的进展表明,近几百万年内可以用二万年的岁差周期,而整个地质历史可以用40万年的偏心率长周期作为地质计时的“钟摆”。本文回顾历史,展望未来,对地质尺度的时间问题进行综述。

1 引言:四千岁还是四十亿岁

“今人不见古时月,今月曾经照古人”,说的是“人”和“月”虽然同时入诗入画,时间尺度上却大不相同。“朝菌不知晦朔,蟪蛄不知春秋”,说的是可怜的小型生物寿命有限,听不到晨钟暮鼓,看不见寒往暑来。其实,你我有幸生而为人,既识晦朔又历春秋,比朝菌蟪蛄神气得多;但要和月亮比起资格来,实在是无地自容。

现在知道,月亮和地球大体上同庚,都已经是四十多亿年的高龄。但这是现在的认识,几百年前,人类或者认为世界永恒,根本没有年龄这一说,或者认为地球、世界的历史不过几千年。流传最广的是爱尔兰大主教 James Ussher 的说法,他在1650年指出世界是上帝在公元前4004年10月23日星期天创造的。其实,这“四千年”并非这位大主教的创新^[1],耶稣降生时地球只有四千岁是当时流行的看法。要等到19世纪末发现放射性元素的衰变,才找到了通过矿物测年的物理学方法求取地球年龄的新途径^[2],再经过几十年的努力,得出地球形成于45亿年前的数据^[3],和 Ussher 的说法相差五个量级。如今,人类对时间的视野还在拓宽,不仅认识到宇宙大爆炸发生在137亿年前^[4],而且进一步探讨宇宙大爆炸是否属于周期性现象^[5]。

当然,人类最为关心的还不是宇宙或者地球的年龄,而是和自己生命活动相关的时间尺度。最简单的计时参考系,莫过于昼夜交替和季节更新,这就是日和年,也就是以地球自转和公转为基础的天文计年。再要细一点就可以在日的基础上进一步划分,我国古代就有利用太阳角度定时的日晷,看不见太阳的时候可以用沙

漏、水钟定时。不仅中国自古就分时辰,在巴比伦时代还分出了时、分、秒,而且分、秒的六十进制制一直流传至今^[6]。

随着社会的进步,尤其是科学技术的发展,人类需要关心的时间幅度已经大为扩展,短到亿分之一秒,长到数十亿年。计时的方法和标准也随之大为变化,只是行外人士对时间的概念变化不大,一说到时间,想起的不是手表就是日历。本文就是想从计时概念与技术的进步入手,漫谈人类对时间认识的发展;而且“三句不离本行”,重点放在研究地球历史用的时间概念和计时单元。

2 从天文钟到原子钟

时间的流逝,推进着人类对时间的认识,提高着对时间分辨率的需求。当古人不能以日晷和沙漏为满足的时候,就出现了种种机械计时的尝试,其中一个重大进展是钟摆的发明。尽管伽利略早就注意到用摆锤计时的潜力,第一个钟摆还是要等到17世纪中叶,由荷兰人 C. Huygens 来发明。与以前任何计时装置相比,摆钟的精确度提高了上百倍,而他随后发明的螺旋平衡弹簧,又进一步提高精度、减小体积,导致了怀表的出现。然而再好的摆钟,其精度也只能达到每年误差不超过一秒^[6],再要提高就需另辟蹊径。

测时的原理是运用时间上稳定的周期性过程,其实物理学上周期性过程的时间范围极大,短到普朗克时间的 10^{-43} s,长到天文上的 $10^{17} \sim 10^{18}$ s,为测时提供了广阔的空间^[7]。因此完全可以跳出机械运动的范畴,发展其他的物理测年方法。果然,1939年出现了利用石英晶

体振动计时的石英钟,每天误差只有千分之二秒,到二次大战后精度提高到30年才差一秒。很快,测年的技术又推进到原子层面,1948年出现第一台原子钟,1955年又发明了铯原子钟,利用 Cs^{133} 原子的共振频率计时,现在精度已经高达每天只差十亿分之一秒^[6]。

原子钟的发明,从根本上改变了计时的标准——从原来依靠天体运动的天文标准,发展到依靠原子运动的物理标准。按照天文定义,一秒的时间应当从年、日、时、分、秒的关系求得,一秒等于 $31\,536\,000$ ($=365 \times 24 \times 60 \times 60$)分之一年。但是天文计时的单位,无论年月日,其实都不稳定。为此,1956年,全球约定:一秒的定义是1990年1月1日12时回归年长度的 $31\,556\,925.974\,7$ 分之一。到1967年,这种定义已被原子钟的定义所取代:一秒是 Cs^{133} 原子在两个能态之间周期性振荡 $9\,192\,631\,770$ 次的时间^[6]。

天文钟和原子钟既然原理不同,计时当然也有差异。由于天文周期有不稳定性,时间久了,“原子时”和天文的“世界时”之间产生差异,只好用“闰秒”的办法来解决:2005年末、2006年初增加一个闰秒,就是这个道理。

3 从化石定年到同位素测年

时间概念,不仅向着越来越精细、越短促的高分辨率方向,而且也在向长久、遥远的大尺度方向发展,朝着地球历史的早期推进。

地质计时,经历了曲折的历史。地质学的建立就从地层学开始,本身就与时间不可分割;然而那时用的是相对年代序列,指的是地层形成时间先后的定性序列,并不在乎定量的具体年代。识别相对地层年代的依据,主要是生物化石,比如三叶虫的出现是寒武纪的开始,恐龙的灭绝是白垩纪的结束,而这寒武纪、白垩纪无非是科学家命名的一种代号,究竟距离今天有多少年并没有测定,而且对于早期的地质学来说也并不重要。当时地质学的任务在于找矿,重要的是识别某个时代的地层,比如石炭纪地层含煤矿,而鳞木化石指示石炭纪,找到有鳞木化石的地层,就有可能找到煤矿。发展到现在,地质学的任务已经从找矿勘探扩展到环境保护与预测,性质也从现象描述进展到机理探索,定量的时间概念变成了关键,测年的重要性也提升到空前的高度。

地质学产生的早期,确实缺乏手段,无从猜测地层的形成究竟花了多长的时间,只能从今天的地质过程提出自己的推想。比如海水的盐分来自大陆化学风化的溶解物质,那么根据今天河流向海洋输送溶解物质的速

率,就可以计算出世界大洋存在的年龄;同样,根据现代的岩石剥蚀作用和沉积作用的速度,可以推算剥蚀出今天的地形、堆积起今天的地层需要花多长的时间。前提是这种地质作用的速率不变,就是所谓“均变论”。地质界的“均变论”,也为当时的生物学革命所接受,比如对生物界的进化,就估计有十亿年历史。达尔文在“物种起源”中专门讨论了岩石风化的缓慢,推论出地质年代数以亿年计。相反的是当时的物理学界,从热力学角度推算太阳的年龄,以及地球从炽热熔融状态冷却固化的年龄,认为地球年龄只有几千万年,绝不会上亿。地质界与物理学界的争论,到了19世纪末期放射性元素发现之后方有结论:因为太阳的能量还在不断产生,不能用简单的热量消耗来计算其年龄^[2],所以地质界的估算要比物理界来得正确。

就在1895年X光发现之后的第二年,发现了铀的放射性,为利用放射性元素的半衰期测定矿物年龄开辟了途径:1904年E. Roservelt首次从一种铀矿物测得五亿年的放射性年龄^[7]。现在放射性测年不仅是地质年代学的基本方法,而且也被天文界用来测陨石追索太阳系的历史,考古界用来测量出土文物的年龄^[8]。

4 日、月、年以上的天文周期

归纳起来,人类计时有两种系统:一种是天文计时,一种是物理计时。前面说到,计时是从天文方法开始的,然而天文上的周期性并不像我们外行人想象的那样规则。以太阳为标准的天文“日”长度并不相等,现在一年之中就可以差51秒;更不用说根据珊瑚化石生长纹判断,四亿年前一年有四百多天^[9],在地质尺度上来讲地球自转速度是在减慢的。如此看来,用独立的物理方法计时,避免天文计时中的不稳定因素,是极为重要的。

但是话又得说回来,尽管有精确物理定义的“秒”,我们日常使用仍然是天文计时,仍然是按昼夜作息、按年度预算。因为天文周期实际上也是人类生活环境的周期,其精度一般讲也足够我们日常使用。即使有了原子钟,仍然需要有历法的天文计时^[10]。时间长度的不同等级有不同的用途,论资历用“年”,发工资按“月”,住旅馆算“日”,打电话计“分”。基于天文周期的年、月、日,和由此派生出来的世纪、星期、小时等等,能够满足人的生命长度与生命活动的需要,使用方便。可是在地质计时中,这些天文周期都显得太短,动不动就要用几亿甚至几十亿年来表示,既不科学、又不方便。不科学是我们根本达不到“年”的分辨率,不方便是无缘无故用那么大的数字,就像平时生活中不用年只用秒,每人要

数千多万年秒过一次生日,活到将近十九亿秒才可以退休,那就非乱了套不行。

地质科学产生至今差不多两百年的历程里,我们习惯于“推己及物”,把自己计年龄的单位加给地球。可是既然知道有“今人不见古时月”的尺度差异,我们能不能找一找:在日、月、年之上,还有没有更长一点的天文周期,适宜于地球和月亮使用?回答是有的。这种周期确实有,而且已经开始使用,这就是地球在太阳系里运行轨道几何形态变化的周期,简称轨道周期。

地球绕太阳公转,遵照牛顿定律是极其规则的运动。但是太阳系里还有其他行星,地球身边还有月亮作伴。相互干扰的结果,地球的运行轨道,包括绕太阳公转的黄道和地球自转的赤道面,就会周期性地出现偏差。周期性变化的轨道参数有三种:岁差,斜率与偏心率。地球自转轴呈陀螺般的晃动,叫做岁差;地球赤道和黄道之间的夹角叫做斜率,也在周期性变化;黄道呈椭圆形,但有时更圆些、有时更扁些,这就是偏心率。轨道参数不断地在变,只不过我们不加注意罢了;但是地球运行这种几何形态上的微小变化,都会影响太阳辐射量在地球表面的分布,通过地球气候系统的放大效应,最终可以导致冰期的重复发生^[11]。

三个参数中最先发现的是岁差。所谓“岁差”就是岁岁有差别,我国晋朝的虞喜就发现冬至点每年有所移动,五十年沿黄道西移一度。现在知道这是 21 000 年的周期,具体表现是地球在黄道上到达近日点的日期逐年变化。从气候角度说,如果地球在夏至到达近日点、冬至到达远日点,一年内季节的差异就会加强;相反,如果冬至到达近日点,夏至到达远日点,气候的冬夏差别就会减少。岁差周期影响气候季节性,所以季风强弱就会有两万年左右的周期。地球的斜率也在变。现在回归线在 23.5°,这是今天地球的斜率;但是它在 22.2°与 24.5°之间变动,41 000 年一个周期。现在斜率每年减少 0.5°,所以北回归线正在南移。比如台湾的嘉义县 1908 年建造的北回归线标志,到 1996 年已经落在北回归线以北 1.27 km,到 9 300 年后更要相差 90 km^[12]。斜率角度增大会使太阳辐射量在高纬区的份额加大,所以对高纬度的气候有重要影响;假如斜率一旦大于 54°,极地就会比赤道还热。

第三个轨道参数偏心率,它反映黄道圆不圆,随着黄道短轴的长度伸缩,椭圆形的黄道有接近 100 000 年周期的变化,导致不同季节地球与太阳距离的不同;但由于这种变化幅度太小,对于气候的直接影响可以不计。偏心率影响气候,主要依靠调控气候岁差变化的幅度,偏心率越大,岁差造成的气候变化越大。道理很简

单:假如偏心率小到为零,黄道成了圆形,也就谈不上什么近日点、远日点,和岁差的气候效应了。

这样,二万年的岁差,四万年的斜率和十万年的偏心率周期,通过太阳辐射量的时空分布变化影响着地球上的气候。但是与日、月、年不同,这类天文周期时间长、变化小,只有靠地质时期里的长期积累才会有显著的效果。果然,这类天文周期的发现,是在近几十万年来的冰期记录里。

5 地球轨道和冰期旋回

地质学界会对轨道周期发生兴趣,原因就在于大冰期。两万年前,世界大陆有三分之一压在几千米厚的冰盖下面,而且这种大冰期曾经在最近一百多万年来来的第四纪里重复出现,什么原因却并不清楚。经过长期争论,终于发现原因在于地球运行轨道的周期性变化。20 世纪早期,塞尔维亚的米兰克维奇(Milutin Milankovitch)以北纬 65°N 的高纬区为标准,计算夏季接受太阳辐射量的周期性变化,如果夏季辐射量不太大,北半球高纬区的积雪不会融化,就可以逐渐堆积而形成大冰盖。这项假设提出后遭到几十年的冷遇,直到半世纪之后的 20 世纪 70 年代,深海沉积物的氧同位素分析证明冰期旋回与轨道周期相符,方才得到学术界的承认,这就是所谓“米兰克维奇理论”:冰期旋回的原因在于地球轨道参数的变化^[13]。

既然冰期按轨道周期发生,就可以拿冰期作为计时的标准。全球冰盖的大小反映在海水的氧同位素上,因此深海沉积的地层年代就采用氧同位素分期(MIS)来表达,今天属于 MIS 1 期,2 万年前的大冰期是 MIS 2 期,一直数到一百多期。但是每次冰期旋回的长度并不一致:早先的旋回四万年,是斜率周期;最近六七十万年以来又变为十万年一次冰期。更大的问题是在地质历史的长河里,极地有大冰盖、气候有冰期旋回的只是少数,多数时间里没有冰期。因此,依靠冰期旋回表达的轨道周期,只能有局部的应用价值。

好在地球轨道参数影响太阳辐射量的分布,并不限于高纬区。前面说过,岁差影响气候的季节性,当近日点在夏至的时候季节性加强,季风和季风雨也就特别强盛。在非洲,强大的季风雨可以造成尼罗河特大规模泛滥,洪水流到地中海引起浮游生物的勃发,海底形成富含有机质的“腐泥层”^[14]。季风洪水随着岁差变,所以两万年出现一次的“腐泥层”,就是岁差的标记。岁差两万年一个周期可以编号,现在近日点靠近冬至,是岁差的高峰,编为 1 号;一万年前近日点在夏至前后,是岁差

的低谷,编作 2 号。这样从现在向古代上推,一个岁差周期编两个号(岁差高峰单号,低谷双号),大约 180 万年前的第四纪开始就编到 176 号,此前的上新世就从 176 号编到 530 号,相当于 180.6 万年到 533.3 万年以前的一段历史^[15]。今天意大利南方的地层,从前就是地中海海底的沉积,里面保留着这些腐泥层,上面说的编号就是在那里应用,成为地质年代天文计时的一个样板。

但是,两万年的岁差周期只是近几百万年来事。由于地球受潮汐摩擦的原因,岁差周期是在变长的。据计算,今天平均 21 000 年的岁差周期,在五亿年前只有 17 000 多年。斜率也一样,今天 41 000 年的斜率周期当时也只有 29 000 年^[16]。即便在近几百万年,由于冰期时地球受冰盖载荷的影响,岁差和斜率周期的长度也会受到影响^[17]。上面说的用岁差周期作为地质计时单位,只能适用于最近几百万年。由于其时间长度不稳定,岁差和斜率难以成为整个地质时代计年的“钟摆”,这种“钟摆”,得靠第三个轨道参数——偏心率。

6 地质计时的“钟摆”——四十万年偏心率长周期

前面介绍地球轨道参数时只说有 10 万年的偏心率,其实偏心率还有 40 万年的长周期,它们都不受潮汐影响,具有稳定性;尤其是 40 万年的偏心率长周期,是天文上最为稳定的轨道参数^[18]。上面说过,偏心率主要通过调控岁差的变化幅度影响气候,而岁差变化幅度越大,气候的季节性变化越强。所以偏心率增大,就会加强气候的季节性变化;假如偏心率等于零,岁差对季节性的影响也就等于零。这种作用在低纬度区最为明显,比如地中海按岁差周期出现的“腐泥层”,偏心率最小的时期不能形成,只有石灰岩的连续沉积^[19],因此从远处就可以看出地层的轨道周期来。谓予不信,请到西西里岛一游。那是意大利著名的旅游点,崖岸上石灰岩和腐泥层的韵律,就是轨道周期的记录,其中游泳之后享用日光浴的厚层灰岩,就是 40 万年周期偏心率最小时的产物。

在较老的地质年代里,最容易辨认的是 40 万年长周期,一方面这种长周期造成的气候变化幅度大,便于识别;另一方面时间长度大,对时间分辨率的要求低,容易确定。因此在不同年代的地质记录里都可以适用,被誉为地质计时的最佳“音叉”^[20]。现在,40 万年长周期不仅在三亿多年前美国东北的湖泊^[21],或者一千多万

年来的贝加尔湖^[22]沉积中有发现,而且世界大洋的碳储库普遍存在 40 万年的长周期^[23,24]。学术界终于开始明白:这 40 万年周期,是地球上气候变化一种最基本的“节律”。地球上大部分时间没有大冰盖,那时候气候变化主要受低纬度区控制,因此岁差和调谐岁差变幅的偏心率周期,就显得格外重要。过去轨道周期的研究大多局限于第四纪晚期的冰期旋回,那是地球历史上非常特殊的时期,而且总共只有几十万年,当然看不到长周期。

于是,有人建议将地质时期按 40 万年偏心率周期编年,具体说是用偏心率最低值作为一个 40 万年周期的标记,从新到老编号排序^[25]。从最近一个偏心率最低值,也就是一万年前起算,编号为“1”,那么往前数,北半球冰盖的形成应当在第“7”期,地中海变干发生在第“16”期,如此等等。再往前,6 500 万年前白垩纪末恐龙灭绝,按偏心率长周期就是“162”期;距今 14 500 万年的侏罗纪末,就是“360”期^[20]。

总之,地质界已经在日、月、年之上,提出了更长的天文周期用来计时,一个是大约两万年的岁差,一个是大约 40 万年的偏心率。其中 40 万年周期适用于整个地质历史,是最有希望的地质计时单位。当然这里的计时全是指地质尺度,无论是人寿保险,还是工程设计都不会采用这种计时单元,但是对于地质历史和环境演变的研究说来,却是找到了自己的“钟摆”。

7 结束语——翻开地球的“万年历”

就像现在有了原子钟,还要有历法一样,地质历史的同位素测年,无法替代天文周期的计时。因为同位素测年可以求出时间长度,却提供不了天文周期反映的环境变化韵律。不管短到日、年,还是长到岁差、偏心率,都是环境韵律的标志。古人“日出而作,日入而息”,因为白天便于耕种,黑夜宜于睡眠。岁差低谷时地中海形成“腐泥层”,偏心率低值时堆积石灰岩,这也是天文周期,只是你我寿命太短,不通过专家的研究看不出来,和“朝菌不知晦朔,蟪蛄不知春秋”是一个道理。因此,将天文周期引进地质年表,其意义不仅在于提高地质年代的精度,还有助于理解地质过程的机理。

可以预见,未来的地质年表,既有同位素测年的数据,也有天文周期、主要是偏心率长周期排序的“年龄”。只有理清地质历史上的周期性,才能编制地球的“万年历”。一旦掌握了这种“万年历”,其影响将远远超出地质学的范围,因为人类对于大大超过自己生命长度的变化了解实在太少。今天面对“温室效应”,疾呼“全球变

暖的学术界,三十年前曾经鼓吹过“下次冰期”即将降临;直到现在,下次冰期究竟什么时候来,预测仍然大相径庭,有的说还得五万年,有的却说已经在来临。分歧的原因是不了解轨道变化究竟如何影响地球上的气候,尤其对于如何影响碳储库,至今众说纷纭^[26]。40万年偏心率既是季风的周期、风化作用的周期,又是大洋碳储库的周期,很可能还是海平面升降的周期。今天的地球正在经历着40万年偏心率周期的低值期,大洋碳储库的反应也早已出现,当务之急是要去解读这种长周期变化的环境意义^[27]。不认识地质时期里冰期旋回、碳储库变化周期与轨道参数的关系,要对未来环境长期变化趋势做出科学的预测,是不现实的。

研究天文长周期,不单是地质学请教天文学;相反,天文学也会得益于地质学。天文周期的计算,在时间上有着一定的极限^[18];过于古老的天文周期,天文学已经无能为力,只能将来从地质纪录里去寻找,靠地质学提供。利用地质纪录推测轨道周期的作法,不但有了初步尝试^[28],而且还在地外星球的航天探测中使用。火星极地上发现有2500米厚的冰盖,冰盖上的亮、暗条带表明有冰雪与尘埃的互层,应当和地球上一样是轨道驱动下冰期旋回的产物。经过计算,求出了火星的轨道周期是:岁差51000年,斜率120000年,偏心率95000年至99000年^[29]。至于这结论的准确程度将来如何验证,恐怕你我都不见得等得到。

进一步讲,计时和周期的问题同样存在于生物学。演化生物学本来和地质学一样探讨时间问题,而生物大分子进化速率稳定性的发现^[30],为生物演化研究的计时提供了标准,为建立演化的“生物钟”创造了条件^[31]。对于天文周期,生物界和地球气候系统一样,也会作出自己的反应。现在已经知道,生物个体内要有“生理节奏钟”响应昼夜与季节的变化^[32],要有内在的“发育钟”机制协调个体发育的生长过程^[33]。那么,在生物界的高层次上,是不是也会有生物圈对于天文长周期的响应呢?这样的问题也许提得过早,在基因层面上研究生物与天文周期的关系,目前还刚刚起步。可以肯定的是,地球“万年历”的编制,天文长周期在不同学科中的引入,必将开拓人类认识世界的时间范围,提高预测长期变化的能力。到那时,尽管还是“不见古时月”的“今人”,却能够有声有色地开讲包括地球在内的“太阳系演义”。

(2006年1月5日收到)

- 1 FULLER J G C M. A date to remember: 4004 BC [J]. *Earth Sciences History*, 2005, 24: 5-14.
- 2 KNELL S J, LEWIS C L E. Celebrating the age of the Earth [G]. In: KNELL S J, LEWIS C L E. (Eds.), *The Age of the Earth:*

- From 4004 BC to AD 2002. *Geol Soc London, Spec. Publ.*, 2001, 190: 1-14.
- 3 PATTERSON C C. Age of meteorites and the Earth [J]. *Geoch Cosmoch. Acta*, 1956, 10: 230-237.
- 4 VENEZIANO G. The myth of the beginning of time [J]. *Scientific American*, 2004, 30-39.
- 5 STENHARDT P J, TUROK N. Cyclic model of the Universe [J]. *Science*, 2002, 296: 1436-1439.
- 6 ANDREWES W J H. 钟表的编年史 [J]. *科学*, 2002, (11): 54-63.
- 7 AUDON C, GUNOT B. The Measurement of Time. Time, Frequency and the Atomic Clock [M]. UK: Cambridge University Press, 2001, 335.
- 8 ODIN G S (Ed.). *Numerical Dating in Stratigraphy* [M]. Part I. New York: Wiley & Sons, 1982, 630.
- 9 WELLS J W. Coral growth and geochronometry [J]. *Nature*, 1963, 197: 948-950.
- 10 余明主编. 简明天文学教程 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 404.
- 11 RUDDIMAN W F. *Earth's Climate: Past and Future*. N. Y: Freeman & Co., 2001, 465.
- 12 CHAO B F. 'Concrete' testimony to Milankovitch cycle in earth's changing obliquity [J]. *EOS*, 1996, 77: 433.
- 13 HAYS J D, MBRIE J, SHACKLETON N J. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice age [J]. *Science*, 1976, 194: 1121-1132.
- 14 ROSSIGNOL-STICK M, NESTEROFF V, OLIVE P, et al. After the deluge: Mediterranean stagnation and sapropel formation [J]. *Nature*, 1982, 295: 105-110.
- 15 LOURENS L J, ANTONARAKOU A, HILGEN F J, et al. Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical timescale [J]. *Paleoceanography*, 1996, 11: 391-413.
- 16 BERGER A, LOUTREM F, LASKAR J. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies [J]. *Science*, 1992, 255: 560-566.
- 17 LOURENS L J, WEHAUSEN R, BRUMSACK H J. Geological constraints on tidal dissipation and dynamical ellipticity of the Earth over the past three million years [J]. *Nature*, 2001, 409: 1029-1033.
- 18 LASKAR J. The limits of Earth orbital calculations for geological time-scale use [J]. *Philos. Trans. Royal Soc. London*, 1999, A1757: 1735-1759.
- 19 HILGEN F J. Astronomical calibration of Gauss to Matuyama sapropels in the Mediterranean and implication for the Geomagnetic Polarity Time Scale [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1991, 104: 226-244.
- 20 MATTHEWS R K, FROELICH C. Maximum flooding surfaces and sequence boundaries: comparisons between observations and orbital forcing in the Cretaceous and Jurassic (65-190 Ma) [J]. *Geoscientific Middle East Petroleum Geosciences*, 2002, 7 (3): 503-538.
- 21 OLSEN P E. Periodicity of lake-level cycles in the Late Triassic Lochatong Formation of the Newark Basin (Newark Supergroup, New Jersey and Pennsylvania) [G]. In: BERGER A., MBRIE J., HAYS J., et al. (Eds.), *Milankovitch and Climate*. NATO ASI, 1984, C126: 129-146.
- 22 KASHIWA Y A, OCHIAI S, SAKAI H, et al. Orbit-related long-term climate cycles revealed in a 12 Myr continental record from Lake Baikal [J]. *Nature*, 2001, 410: 71-74.

- 23 汪品先, 田军, 成鑫荣等. 探索大洋碳储库的演变周期 [J]. 科学通报, 2003, 48 (21): 2216-2227.
- 24 WANG P X, TIAN J, CHENG X, et al Major pleistocene stages in a carbon perspective: The South China Sea record and its global comparison [J]. Paleoclimatology, 2004, 19, PA 4005, doc 10. 1029/2003PA000991.
- 25 WADE B S, PÄLKE H. Oligocene climate dynamics [J]. Paleoclimatology, 2004, 19: PA4019.
- 26 汪品先. 气候演变中的冰和碳 [J]. 地学前缘, 2002, 9 (1): 85-93.
- 27 WANG P X, TIAN J, CHENG X, et al Carbon reservoir change preceded major ice-sheet expansion at the Mid-Brunhes event [J]. Geology, 2003, 31: 239-242.
- 28 PÄLKE H, LASKAR J, SHACKLETON N J. Geologic constraints on the chaotic diffusion of the solar system [J]. Geology, 2004, 32: 929-932.
- 29 LASKAR J, LEVRARD B, MUSTARD J F. Orbital forcing of the martian polar layered deposits [J]. Nature, 2002, 419: 375-377.
- 30 KMURA M. Evolutionary rate at the molecular level [J]. Nature, 1968, 217: 624-626.
- 31 张昀. 生物进化 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1998: 266.
- 32 SCHULTZ T F, KAY S A. Circadian clocks in daily and seasonal control of development [J]. Science, 2003, 301: 326-328.
- 33 DUBOULE D. Time for chronomics [J]. Science, 2003, 301: 277.

Sketching the Earth's Almanac

Wang Pin-xian

CAS Member, State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji

University, Shanghai 200092

Key words time, astronomical time scale, orbital forcing, long eccentricity

《自然杂志》编辑委员会 (按姓氏笔画为序)

- 万天丰 教授 中国地质大学
- 方精云 中国科学院院士 北京大学
- 刘锦川 (C. T. Liu) 美国工程院院士 中国工程院外籍院士 橡树岭国家实验室, 田纳西大学
- 朱清时 中国科学院院士 中国科技大学
- 许政 ⑥ 教授 上海大学
- 何鸣鸿 研究员 国家自然科学基金委员会
- 杨雄里 中国科学院院士 复旦大学
- 汪品先 中国科学院院士 同济大学
- 周邦新 中国工程院院士 上海大学
- 林国强 中国科学院院士 中国科学院上海有机化学研究所
- 郑光美 中国科学院院士 北京师范大学
- 郑树森 中国工程院院士 浙江大学
- 胡升华 编审 科学出版社
- 赵君亮 研究员 上海天文台
- 高登义 研究员 中国科学院大气物理研究所
- 傅家谟 中国科学院院士 上海大学
- 董远达 教授 上海大学
- 解思深 中国科学院院士 第三世界科学院院士 中国科学院物理研究所
- 薛其坤 中国科学院院士 清华大学 中国科学院物理研究所
- 戴汝为 中国科学院院士 中国科学院自动化研究所