

地质计时的天文“钟摆”

汪品先

(同济大学 海洋地质国家重点实验室, 上海 200092)

摘要:地球系统科学的发展,对于地质过程的时间度量提出了新要求。迄今为止,地球轨道参数的变化是地质尺度上惟一可以精确定量计算的周期现象,可以用作地质计时的标尺。40万年的偏心率长周期,是地质历史上最为稳定的轨道参数,至少在新生代以来通过低纬过程驱动着大洋碳储库的周期变化,是普遍出现而且容易辨认的轨道周期,可望作为地球历史的天文“钟摆”用于地质计时。

关键词:天文年代学; 轨道周期; 长偏心率; 岁差

中国分类号:P533

文献标识码:A

文章编号:0256-1492(2006)01-0001-07

研究地球历史的地质学,时间是她最基本的量化概念。早期的地质学重在找矿,注意的是地层形成的先后次序,用的只是相对时间序列。19世纪末期放射性元素衰变现象发现之后,有了测定矿物绝对年龄的方法,从此地质学有了计时的物理标准。然而到了20世纪晚期,研究地球系统、预测环境变化,这就不但要有物理计时,还要寻找引起环境周期变化的天文计时标准。为此,有必要对地质学的计时标准进行简单的回顾,探讨地球轨道周期作为地质计时单位的前景。

1 地质年代的物理计时与天文计时

今年第一条新闻,是2005年底和2006年初之间增加了一秒,这就是所谓的“闰秒”。小小的一秒,却暴露了物理计时和天文计时之间的矛盾。

人类计时从天文开始。昼夜交替、季节更新,是最容易看到的计时参考系,于是就有了日与年。再要细分,就发明了日晷利用太阳角度定时,看不见太阳的时候就用沙漏、水钟,这样就从天文转到了物理。钟摆的发明为物理计时开创了新阶段,不过再好的钟摆钟,也只有每年误差不超过一秒的精度。对于“日出而作,日入而息”的古人来说,这一秒钟毫无意义;但在现代社会,一秒钟就是航天飞船将近8万km的行程。于是随着社会的需求,机械钟又发展到了石英钟、原子钟。原子钟利用铯原子的共振频率计时,精度已经提高到每天只差10亿分之1秒^[1]。

作者简介:汪品先(1936—),男,教授,中国科学院院士,从事海洋地质和微体古生物研究。

收稿日期:2006-01-13; 改回日期:2006-01-16 文凤英编辑

物理计时和天文计时,前者准确,后者方便。从天文计时出发,一秒钟的定义是 $31\ 536\ 000 (=365 \times 24 \times 60 \times 60)$ 分之1年。但是天文计时的单位,无论年月日,其实都不稳定。为此,1956年始全球约定:一秒钟的定义专指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物理定义所取代:一秒钟是 Cs^{133} 原子在两个能态之间周期性振荡9 192 631 770次的时间^[1]。由于地球转速有变慢的趋势,天文计时和原子钟的物理计时就有差异,只好用加“闰秒”的办法来解决^[2],2006年晚到一秒钟,根源在此。“闰秒”的添加并不规则,1972—1998年的26年间,出现了22个闰秒,而1999—2006的7年间只有一个“闰秒”,反映了物理和天文计时关系的复杂性。不过物理定义的“秒”尽管精确,日常广泛使用的仍然是天文计时,因为天文周期实际上也是人类生活环境的周期,年、月、日和由此派生出来的世纪、星期、小时等等,与人类一般活动的时间尺度相对应,能够满足通常的需要。

然而地质计时与此不同。地质年代的度量,靠的是物理方法而不是天文方法。1904年E.Roservelt从一种铀矿物测得5亿年的放射性年龄,建立了测定地质年龄的物理学方法^[3]。这里所说的“年”,其实并非天文计时的结果,而是放射性元素衰变速度的物理计时单位。地质计时用“年”,犹如人类生活之用“秒”,并非最佳选择,起码动不动多少亿的数字并不方便。我们决不会每数三千多万秒过一次生日,活到19亿秒去办理退休;但是我们习惯于讲25亿年前元古代开始,5亿多年前“寒武纪大爆发”。这里虽然说的是多少年,其实根本达不到“年”的精度。

人类为地球计时,不能盲目套用自己在生活中

习惯使用的单位,地球“钟”应当使用地质尺度的“钟摆”。日、月、年是适合于人类生活使用的天文周期,在日、月、年之上,有没有更长一点的天文周期,可以让地球历史使用?这就是万年尺度的轨道周期。

2 轨道周期的冰盖响应与季风响应

20世纪中期古气候研究的重大突破,是米兰科维奇轨道理论的确认,证明地球运行轨道几何形态的周期性变化,可以引起冰期旋回。米兰科维奇用的轨道参数有3个:2万年的岁差、4万年的斜率和10万年周期的偏心率(图1)。与日、月、年不同,这类轨道变化十分缓慢,是太阳辐射量在地球上季节和纬度分布的微小变化,经过地质时期的长期积累,才足以造成冰盖消长、气候旋回。学术界从拒绝到承认轨道驱动气候旋回的概念,至少付出了半个世纪的代价。20世纪70年代,深海沉积物的氧同位素分析证明冰期旋回曾经多次发生,而且与计算得出的轨道周期相符,米兰科维奇理论才得到证明^[4];同时也就产生了气候周期用于地质计时的方案。既然周期性冰期旋回能够通过同位素等方法在全球范围内辨认,就可以用作地质年代对比的标志,这就是氧同位素分期(MIS, marine isotope stage)。第四纪海洋地质研究就是根据轨道周期的计算,对氧同位素记录进行天文调谐,从而求出精确的地质年代。

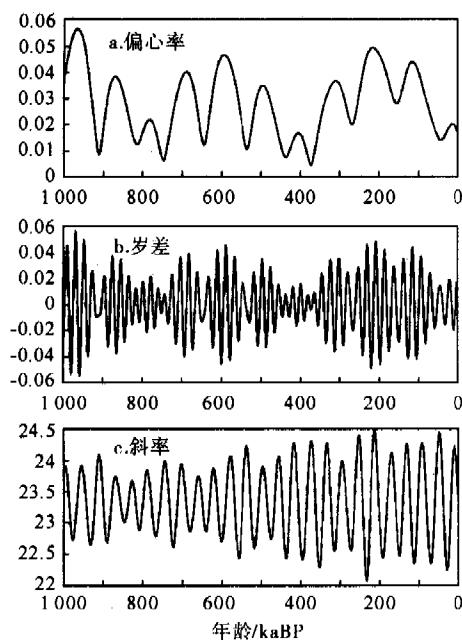


图1 近100万年来的地球轨道参数

Fig. 1 Earth's orbital parameters over the last 1 Ma
(a. eccentricity; b. precession; c. obliquity)

我国对南沙大洋钻探ODP 1143井的500万年高分辨率地层序列,就是这样建立的^[5]。

然而,冰期旋回的时间长度并不相等,难以用作计时的单位。一次冰期旋回在第四纪早期是4万年左右,到晚期就变为10万年,而且10万年也只是平均数,从8万年到12万年都有;更何况地质历史上极地有大冰盖、气候有冰期旋回的只是少数时段,大部分时间并没有冰期发育。传统的米兰科维奇理论除了受适用时间范围的限制外,还有空间上的局限性。当时,米兰科维奇以北纬65°的高纬区为标准,根据算出的夏季太阳辐射量推论冰盖的消长,因此重点在于高纬区的物理过程,不大注意低纬区和生物地球化学过程的变化。既然太阳普照全球,那么轨道驱动的辐射量变化在低纬区也应有反映,问题是低纬区的表现与高纬区有什么不同?

原来不同的轨道参数对气候变化的作用并不相同。斜率的影响在于辐射量的纬度分布,斜率角度增大,会使太阳辐射量在高纬区占的份额加大,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。岁差主要影响辐射量的季节分布,具体表现在到达近日点的日期变化。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。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;假如偏心率小到为零,黄道成了圆形,没有近日点、远日点的差别,岁差的气候效应也就消失。因此,斜率对高纬区影响大,岁差和偏心率对低纬区影响大^[6]。轨道参数不仅会在高纬区影响冰盖的涨缩,还能在低纬区影响季节性、季风气候,所以地球气候系统对于轨道变化,既有冰盖响应,又有季风响应^[7]。接下来的问题是:季风响应造成的轨道周期记录,在地质计时中有没有用处?

3 地质计时的岁差标尺与偏心率标尺

当代地球系统的重大特色,就是横跨亚、非、澳三大洲的季风系统,其中非洲大陆跨越赤道,使得非洲季风受轨道驱动的效果最为清晰。无论非洲湖泊或者大西洋海底,都留下了季风盛衰2万年岁差周期的记录。岁差影响气候的季节性,岁差低谷时因为近日点在夏至,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的泛滥,洪水流到地中海引起浮游生物的爆发和海水的分层,在海底形成富含有机质的腐泥层^[8]。季风、洪水随着岁差变,所以2万年出现一次

的腐泥层就是岁差的标记。地中海东部海底沉积柱状样里就记录了这种周期(图2)^[9]。

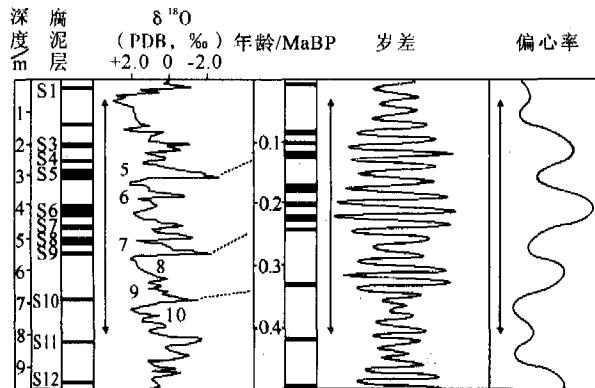


图2 东地中海晚第四纪的腐泥层分布与岁差周期的天文年代学(据文献[9]修改)

“S1”等表示腐泥层编号;双向箭头表示40万年偏心率长周期

Fig. 2 Stratigraphic distribution of late Quaternary sapropels in a deep water sediment core from the Eastern Mediterranean and its astronomical chronology (modified from reference[9])

“S1”is numerical code of sapropels; arrow shows the time range of one cycle of 400-ka long eccentricity.

地中海的沉积随着构造运动上升成为意大利南方的陆上地层,其中不少剖面被选为晚新生代的国际层型。荷兰科学家在该区研究上新世层型剖面时,利用其中的腐泥层或者与此相当的暗色层作为岁差标志,进行年代调谐和编号,建立了天文地层序列。图3是意大利西西里岛上新世早期Zanclean期的标准剖面,从上新统底开始向上编,共60个岁差周期^[10]。这类编号只适用于该地区剖面的层位对比,如果用于地质计时,编号还需要从头算起,为此Hilgen^[9]提出了“地中海岁差腐泥层编码”(MPRS, Mediterranean Precession-Related Sapropel coding),以现代为起点将每个岁差周期编两个号,岁差高峰为单号,岁差低谷为双号(表1)。现在近日点靠近冬至,是岁差的高峰,编为1号;1万年前近日点在夏至前后,是岁差的低谷,编作2号。这样由新到老向古代推,大约180万年前的第四纪开始就编到176号,而上新世从176号到530号,相当于180.6~533.3万年的一段历史^[11]。

然而,用腐泥层识别的岁差,作为地质计时标准也存在着严重的局限性。首先,腐泥层属于地中海特有的现象,难以向其他区域推广;其次,从图2和3可以看出,不是每个岁差都有对应的腐泥层,因而得出的岁差序列不够连续;第三,岁差的时间长度并不稳定,难以在较早的地质历史中应用。2万年长

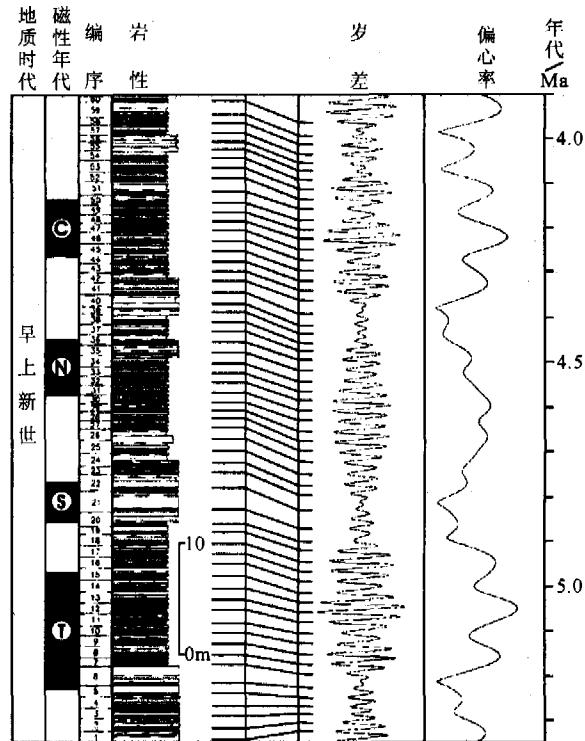


图3 意大利早上新世国际标准地层的岁差周期与地质年代岁差编序(据文献[10]修改)

岩性:黑色为富有机质灰色泥灰岩层,相当于腐泥层,代表高生产力;白色为浅色灰岩,灰色为米色灰岩,均代表低生产力

Fig. 3 Precession cycles and their numeration in the early Pliocene stratotype in Italy(modified from reference[10])

Lithology: black color denotes organic rich grey marls, corresponding to sapropels and indicating high productivity; white and grey colors denote grey and beige limestones respectively, and indicate low productivity.

表1 “地中海岁差腐泥层编码”实例(据文献[9]修改)

Table 1 Examples of the “Mediterranean Precession-Related Sapropel coding”(modified from reference[9])

腐泥层	MPRS 编码	年龄/kaBP
S1	2	8
S2	6	56
S3	8	79
S4	10	102
S5	12	123
S6	16	172
S7	18	194
S8	20	216
S9	22	238
S10	30?	331
S11	38?	405
S12	46?	481

的岁差周期,只是近几百万年来的事;由于地球受潮汐摩擦的原因,岁差周期在逐渐变长。据计算,今天平均21 000年的岁差周期,在5亿年前只有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^[12]。即便在近几百万年里,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^[13]。因此作为地质计时单位,岁差周期只适用于最近几百万年;要为整个地质时代计时寻找“钟摆”,还得依靠第三个轨道参数——偏心率。

4 偏心率长周期的计时意义与环境意义

讨论地球轨道参数时通常只谈10万年的偏心率,其实偏心率还有40万年(准确地说应为40.5万年)的长周期,它们都不受潮汐影响,时间长度具有稳定性,尤其是40万年的偏心率长周期,是天文上最为稳定的地球轨道参数^[14]。偏心率主要通过调控岁差的变化幅度影响气候,因此和岁差一样,主要影响低纬区的过程而进入气候系统。偏心率越大,岁差变化幅度越大,气候的季节性和季风气候也越强。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,因此,腐泥层集中在偏心率高值期,呈束状分布^[9](图2、3)。

如果说岁差周期靠腐泥层作标志有地域上的局限性,那偏心率长周期的表现遍及全球,并无区域限制。我们最近的研究表明:世界大洋的碳储库有着40万年偏心率的长周期变化。南海大洋钻探的研究中,通过碳同位素分析发现了这种长周期^[15],现已证明是全大洋共有的特征,在碳酸盐沉积旋回中也有表现,推断是热带辐射量变化驱动季风降雨的产物^[16-17]。碳同位素和碳酸盐记录中的偏心率长周期,全球以地中海的表现最为典型,原因就在于腐泥层的周期性沉积。可见大洋碳储库的长周期变化,是季风气候通过风化作用和浮游植物群的成分,改变有机碳在海洋碳沉积中的比例所致,属于热带成因。由于大洋中碳的滞留时间长达十余万年,全大洋规模的碳储库变化对于10万年以下的冰期旋回并不敏感^[18],因而受轨道驱动的变化集中表现在40万年长周期上。

近年来,从古新世到中新世的大洋钻探岩心剖面中,普遍发现有碳同位素的偏心率长周期存在,而且在碳、氧同位素记录中都有显示。例如热带太平洋钻井渐新世的400多万年记录中^[19],氧、碳同位

素的40万年长周期与偏心率变化一致,其中碳同位素的表现尤为清晰(图4)。对于冰盖发育以前的地质时期如古新世,氧同位素波动不大,因此可以用碳同位素而不是氧同位素记录调谐年龄、对比地层^[20]。

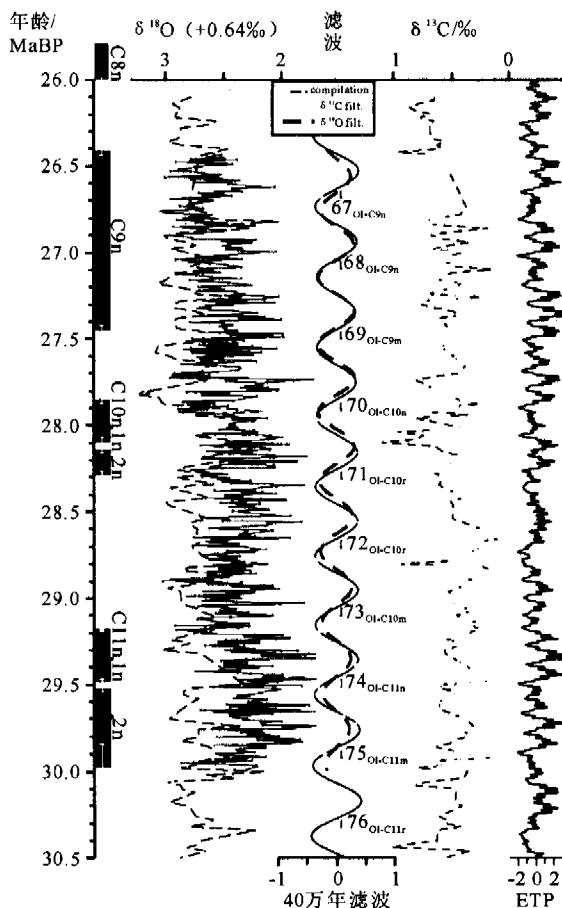


图4 渐新世的偏心率长周期及地质年代偏心率
编序(据文献[19]修改)

自左至右:古地磁地层年代;ODP 1128井底栖有孔虫氧同位素(虚线为全球综合曲线);1128井氧、碳同位素曲线的40万年低频滤波(虚线)与偏心率长周期(实线),以及地质年代偏心率编序(如68_{OL-C9n});1128井底栖有孔虫碳同位素(虚线为全球综合曲线);辐射量(ETP)

Fig. 4 The long eccentricity cycles and cyclostratigraphic naming scheme for the Oligocene (modified from reference[19])
From left to right: paleomagnetic stratigraphy and age; benthic foraminiferal oxygen isotope record from ODP Site 1128 (dash line shows global compilation); bandpass filters for oxygen (dash line) and carbon (dot line) isotope measurements and eccentricity (solid line), and eccentricity cycle number (such as 68_{OL-C9n}); benthic foraminiferal carbon isotope record from ODP Site 1128 (dash line shows global compilation); insolation (ETP)

40万年长周期的重要优势,是在较老地层里容易辨认。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。因此对不同年代的地质记录

都可以适用,被誉为地质计时的最佳“音叉”^[21]。40万年长周期不仅普遍存在于世界大洋的碳储库记录中^[15~17],在3亿多年前美国东北的湖泊^[22],或者1000多万年来的贝加尔湖^[23]沉积中也均有发现。现在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”。地球历史上极地发育大冰盖的时期只占少数,没有大冰盖时的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是地球气候环境变化的基本韵律,虽然这类周期在第四纪晚期并不明显^[17]。

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^[19]。从最近一个偏心率最低值也就是1万年前起算,编号为1,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,6500万年前白垩纪末恐龙灭绝,按偏心率长周期就是162期;距今14500万年的侏罗纪末,就是360期^[21]。最近出版的“2004地质年表”,已经对新生代采用偏心率编号,新生代从E1上溯到E162,其中更新世为E1—E5,上新世为E6—E14,依次类推(表2),正式宣布轨道地层学时代的开始^[24]。

表2 “2004地层年表”晚新生代的偏心率序列

(转引自文献[24])

Table 2 Long eccentricity cycle numeration for the late Cenozoic in the “Geological timescale 2004”
(simplified from reference[24])

地质年代	分阶	下界年龄/Ma	偏心率长周期编号
更新世		1.81	1—5
上新世	Piacenzian	3.60	6—10
	Zanclean	5.33	10—14
中新世	Messinian	7.25	14—19
	Tortonian	11.60	19—29
中期	Serravallian	13.65	30—34
	Langhian	15.97	35—40
早期	Burdigalian	20.43	41—51
	Aquitanian	23.03	52—58

5 结语

以上讨论,表面看来是个计时单位的具体问题,实质上反映了地球系统科学的新走向。

(1) 地质科学的计时方法经历了3个阶段:19世纪初期以前,单纯依靠相对年龄的早期阶段;19—20世纪末期,物理计时和相对年龄相结合的阶

段;以及近年来正在开始的将天文计时引进地质科学的新阶段。这种演变反映了地质科学目标和手段的变化。以资源勘探为目标的传统地质科学,重点在于空间关系,主要目标是在空间上圈定矿产的所在;如今面对环境变化及其预测的新任务,时间关系的定量研究就变成了地质科学发展的瓶颈。即便在古气候研究中,较高分辨率的研究也局限于晚第四纪,习惯上只把万年尺度的变化列入轨道周期的范畴,百万年以上的只能在构造地质里去寻找解释;现在看来夹在两者之间、不在视域之内的40万年偏心率长周期,恰好就是我们为地质计时寻找的天文“钟摆”。

(2) 随着高分辨率记录向越来越老的地层拓展,地球轨道的长周期和地球表层系统内部的长周期现象,正在成为地质研究中新的生长点。比如说,在10万年和40万年的偏心率周期之上,还有240万年的更长周期^[25];4万年斜率周期的变幅,也被120万年的长周期调控^[19]。一旦不同系列长周期的最低值恰好重叠,就会发生严重的气候环境突变时间。例如14 Ma前中新世蒙特利期结束时的气候变冷事件,可能就是40万年偏心率长周期最低值和120万年斜率长周期最低值的巧合所致^[26]。除此之外,长周期现象还可以由地球系统内部的反馈引起,例如中白垩世多次发生的大洋缺氧事件,数值模拟发现可能是磷的超值供应,引起海洋系统数百万年尺度的“自振荡”所致^[27]。这类长周期现象,通常都被错误地归因于构造运动,其实与构造运动无关。

(3) 轨道周期的研究体现了天文科学与地球科学的交叉,从以上的讨论看,似乎只是地质学受益于天文学,实际上天文学也会得益于地质学。不仅地球轨道变化影响地球的气候,反过来地球的气候变化也会影响轨道参数。比如潮汐摩擦肩底地球转速,但冰期时冰盖增大海面下降导致全球潮汐摩擦的减少,进而使得地球自转加速,影响岁差周期。科学家根据地中海腐泥层的岁差记录,推算出300万年来冰盖影响岁差的天文结论^[28]。同时,地球轨道周期的天文计算,在时间上有一定的极限^[14];过于古老的天文周期,天文学已经无能为力,只能从地质纪录里去寻找,靠地质学提供。利用地质纪录推算轨道周期的做法,不但有了初步尝试^[29],而且还在地外星球的航天探测中使用,比如利用火星冰盖上的亮、暗条带,计算出了火星的轨道周期^[30]。与其他的学科交叉一样,天文和地质科学的结合,必将为无涯学海开辟出新的航线。

致谢:本文插图由田军博士改绘制作,特致谢意。

参考文献(References)

- [1] Andrewes W J H. 钟表的编年史[J]. 科学, 2002, 11: 54-63.
- [2] 余明. 简明天文学教程[M]. 北京:科学出版社, 2003: 404. [YU Ming. Astronomy[M]. Beijing: Science Press, 2003: 404.]
- [3] Audoin C, Guinot B. The Measurement of Time, Time, Frequency and the Atomic Clock [M]. Cambridge University Press, 2001: 335.
- [4] Hays J D, Imbrie J, Shackleton N J. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the ice age[J]. Science, 1976, 194: 1 121-1 132.
- [5] Tian J, Wang P, Cheng X, et al. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic $\delta^{18}\text{O}$ record from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203: 1 015-1 029.
- [6] Short D A, Mengel J G, Crowley T J, et al. Filtering of Milankovitch cycles by Earth's geography[J]. Quaternary Research, 1991, 35: 157-173.
- [7] Ruddiman W F. Earth's Climate. Past and Future[M]. Freeman & Co., N. Y., 2001: 465.
- [8] Rossignol-Strick M, Nesteroff V, Olive P, et al. After the deluge: Mediterranean stagnation and sapropel formation[J]. Nature, 1982, 295: 105-110.
- [9] 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.
- [10] Hilgen F J. Extent of astronomically calibrated (polarity) time scale to the Miocene/ Pliocene boundary[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1991, 107: 349-368.
- [11] Lourens L J, Antonarakou A, Hilgen F J, et al. Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical timescale[J]. Paleoceanography, 1996, 11: 391-413.
- [12] Berger A, Loutre M F, Laskar J. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies[J]. Science, 1992, 255: 560-566.
- [13] 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: 1 029-1 033.
- [14] Laskar J. The limits of Earth orbital calculations for geological time-scale use[J]. Philos. Trans. , Royal Soc. London, 1999, A1757, 1 735-1 759.
- [15] 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, 2 216-2 227. [WANG Pin-xian, TIAN Jun, CHENG Xin-rong, et al. Exploring cyclic changes of the ocean carbon reservoir[J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48: 2 536-2 548.]
- [16] Wang P, 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.
- [17] Wang P, Tian J, Cheng X, et al. Major Pleistocene stages in a carbon perspective: The South China Sea record and its global comparison[J]. Paleoceanography, 2004, 19, PA 4005, doi: 10.1029/2003PA000991.
- [18] Cramer B S. Deconvolving the carbon isotope record (Abstract)[C]. Eos. Trans. AGU, 2003, 84(46), F213.
- [19] Wade B S, P like H. Oligocene climate dynamics[J]. Paleoceanography, 2004, 19, PA4019, doi: 10.1029/2004 PA001042.
- [20] Cramer B S, Wright J D, Kent D V, et al. Orbital climate forcing of $\delta^{13}\text{C}$ excursions in the late Paleocene-early Eocene (chrons C24n-C25n) [J]. Paleoceanography, 2003, 18 (4): 1 097, doi: 10.1029/2003PA000909.
- [21] 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]. GeoArabia, Middle East Petroleum Geosciences, 2002, 7(3): 503-538.
- [22] Olsen P E. Periodicity of lake-level cycles in the Late Triassic Lochatong Formation of the Newark Basin (Newark Supergroup, New Jersey and Pennsylvania) [M]//In: Berger A, Imbrie J, Hays J, et al (Eds.). Milankovitch and Climate. NATO ASI, 1984; C126: 129-146.
- [23] Kashiyawa K, 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.
- [24] 李前裕, 田军, 汪品先. 认识偏心率周期的地层古气候意义[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2005, 30(5): 519-528. [LI Qian-yu, TIAN Jun, WANG Pin-xian. Recognizing the stratigraphic and paleoclimatic significance of eccentricity cycles[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 30(5): 519-528.]
- [25] Matthews R K, Froelich C, Duffy A. Orbital forcing of global change throughout the Phanerozoic: A possible stratigraphic solution to the eccentricity phase problem [J]. Geology, 1997, 25: 807-810.
- [26] Abels H A, Hilgen F J, Krijgsman W, et al. Long-period orbital control on middle Miocene global cooling: Integrated stratigraphy and astronomical tuning of the Blue Clay Formation on Malta[J]. Paleoceanography, 2005, 20: PA4012, doi: 1029/2004PA001129.
- [27] Handoh I C, Lenton T M. Periodic mid-Cretaceous oceanic anoxic events linked by oscillations of the phosphorus and oxygen biogeochemical cycles[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2003, 17(4): 1092, doi: 10.1029/2003GB002039.
- [28] Lourens L J, Wehausen R, Brumsack H L. Geological constraints on tidal dissipation and dynamical ellipticity of the Earth over the past three million years[J]. Nature, 2001, 409, 1 029-1 033.
- [29] Pälike H, Laskar J, Shackleton N J. Geologic constraints on the chaotic diffusion of the solar system[J]. Geology, 2004,

- 32, 929-932.
[30] Laskar J, Levrard B, Mustard J F. Orbital forcing of the martian polar layered deposits[J]. Nature, 2002, 419:375-377.

ASTRONOMICAL “PENDULUM” FOR GEOLOGICAL CLOCK

WANG Pin-xian

(The State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: Development of Earth system science calls for new approaches to time measurement of geological processes. Up to now, the Earth's orbital parameters remain the only periodicities in geology subject to precise calculations and, therefore, may provide new scales for geochronology. The 400-ka long eccentricity is the most stable orbital parameter over the entire geological history and drives long-term periodical changes in the oceanic carbon reservoir through low-latitude processes, at least since the Cenozoic. Being extensively and easily recognizable in geological records, the 400-ka cycles are potentially the astronomical “pendulum” for the geological clock.

Key words: astronomical chronology; orbital cycles; long eccentricity; precession