

A Dating Method by Fossil's Growth Line and Day-Long: Examples from Some Proterozoic and Cenozoic Datings

Haiwei Wu¹, Genyao Wu²

¹21309 Cottonwood Ln, Walnut California

²Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: haiweiwu21309@gmail.com

Received: May 15th, 2017; accepted: Jun. 3rd, 2017; published: Jun. 6th, 2017

Abstract

The rotational velocity of the earth had been becoming slower and slower during all the geohistorical process. It results in the day numbers in one year being fewer and fewer, which is recorded clearly by the growth lines on the fossils. Correspondingly, the day-long (hours in one day) had been becoming shorter and shorter during the geohistory. To make up a function relation among three variables, namely, the earth's age, the stratigraphic chronology and the day-long, we can calculate the age of fossil-bearing strata by the data of day-long indicated by the fossil's growth lines. The paper introduces, briefly, the theoretical thoughts and calculating formulas of the "growth line-day-long dating method" presented by the paper. Some Proterozoic and Cenozoic examples worked by the predecessors are re-dated by the new method, and the comparative study between the both demonstrates that the new method could act as a verification and supplement for the isotopic dating method.

Keywords

Dating Method, Fossil's Growth Line, Day-Long, Calculating Formulas, Proterozoic Examples, Cenozoic Examples

用化石生长线 - 日长推定地层年龄的方法：以元古界和新生界为例

吴海威¹, 吴根耀²

¹21309 Cottonwood Ln, 加利福尼亚州 沃尔纳特

²中国科学院地质与地球物理研究所, 北京

Email: haiweiwu21309@gmail.com

收稿日期: 2017年5月15日; 录用日期: 2017年6月3日; 发布日期: 2017年6月6日

摘要

地史期间地球的自转速度一直处于逐渐减慢的状态, 导致地球1年的天数变少(化石生长线清楚地记录了这个事实), 日长(1天有多少小时)增加。构建起地球年龄、地层时代和自转速度(日长)这三者的函数关系后, 即可用化石生长线记录的日长推定化石赋存地层的年龄。本文概要介绍了新提出的生长线-日长定年法的立论思路和计算方法。对前人研究过的元古界及新生界的若干实例用生长线-日长定年法进行计算并比较两者的结果, 证明本方法可作为同位素定年法的验证和补充。

关键词

定年方法, 化石生长线, 日长, 计算公式, 元古界实例, 新生界实例

Copyright © 2017 by authors 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

地质学家早年已经发现: 生物化石上保存的生长线(growth line)能反映昼夜变化, 生长线的条数与一年的天数有关。例如: 20世纪中期, 我国古生物学家尹赞勋等基于化石生长线的研究, 发现古生代时一年的天数要多于365天[1]。由于地球绕太阳公转1周(即1年)的时间长度是固定的, 古生代时1年的天数大于现今的365天表明当时的地球日长(day-long, 1天有多少小时)小于现今的24小时。限于认识水平, 那时的人们尚不可能揭示地史期间日长的变化规律。

今天, 基于大半个世纪里积累的大量生长线-日长资料, 我们已经发现: 在地质历史的进程中地球的自转速度呈衰减趋势。尽管地球转速的变慢极其微量且可能呈阶梯状(应与地史期间地外物体的灾变式撞击有关), 也可能受某些因素(如强烈的地震、宇宙风暴等)影响而在短时间内呈现非线性的波动, 但生长线指示的日长证据表明: 在地质历史时间的尺度内地球自转速度的衰减系列可近似地描述为均匀减速模式。通过角动量守恒定律[2], 可以得到地球年龄(本文中指地球的地质时期开始、即核幔分离和岩石圈形成的年龄)、地层年代和地球自转速度3个变量构成的函数式; 知道了其中的2个变量, 即可求出第3个变量。

古生代及中生代地层里保存了丰富的生物化石, 据其生长线反映的日长可推定当时地球的自转速度; 同时, 这些地层又可用不同的同位素定年法来测定其绝对年龄值。综合这两方面的大量资料, 可计算出地球的地质年龄约为45亿年或45.49亿年(另文讨论¹)。这一年龄值与太阳神14号探测器取回的月岩样品的精确定年得到的45.1亿年[3]的数值一致, 反映了地球年龄约为45~45.49亿年基本可信。

如果将地层年龄作为未知量, 已知地球年龄为45亿年和用化石生长线记录的日长推定的自转速度, 就可以反推含化石地层的绝对年龄。本文称这一新的定年方法为生长线-日长定年法。这是一种与传统

¹ 吴海威. 2016. 用化石日长计算地球年龄的一种新方法。

古生物定年不同的方法。传统的方法是根据标准化石或特定的化石组合确定化石赋存岩石的相对年龄, 即它在地层年表中的位置。其绝对年龄的获得, 一是沿产化石的地层进行追索以期在相同层位中发现适合于同位素定年的矿物(如海绿石), 二是据与其它火成岩的各种接触关系来确定该套沉积地层的上限或下限(因火成岩石相对容易进行同位素定年), 或把层位上距产化石地层不远的火山岩夹层的年龄近似地当成化石地层的年龄。

生长线 - 日长定年法对确定元古代和新生代地层的年龄尤其有重要的实际意义。元古界(除顶部的埃迪卡拉系外)中没有门类繁多的生物化石发育, 仅有的叠层石化石数量也较为有限, 且元古界已普遍发生变质, 增加了同位素定年的难度和不可信度。新生界尽管不变质, 但我们的研究对象几乎都是陆相地层, 空间分布局限但相变剧烈, 很难进行长距离的追索对比, 所含化石也较少。因此, 本文将在讨论生长线 - 日长定年法的计算公式后, 重点论述该方法在元古界和新生代年中的应用。

2. 生长线 - 日长定年法的计算公式

上文已说明了提出生长线 - 日长定年法的思路, 即地球年龄、地层年代和地球自转速度这 3 者之间的函数关系。本节中将讨论 2 个重要的计算公式: 地球年龄的计算公式和地层时代的计算公式。

笔者已提出(见前脚注): 因地球的惯性矩在地球演化的历史中随时间成正比例变化, 将其代入地球角动量守恒定律[2], 可得到地球自转速度衰减的数学表达式, 并求得某一地史时刻地球自转的角速度 $\omega_x = A\omega_q / (A - T_x)$, 它也可以写成地球自转速度衰减的全时间长度, 即地球年龄的计算公式:

$$A = T_x \omega_x / (\omega_x - \omega_q). \quad (1)$$

式中, A 为地球年龄, 单位: Ma (中国人常习惯用“亿年”做单位), T_x 是地史期间的某一时间点, 单位: Ma, 故 $T_x < A$; ω_x 是该时间的地球自转角速度, 单位: rad/s; ω_q 是现今的地球自转角速度, 单位: rad/s。利用现有文献上记载的古生代和中生代化石生长线 - 日长及其相应层位的同位素年龄值的大量研究成果, 代入(1)式即可得到地球年龄值 A 的范围在 4495~4549 Ma (44.95 亿年到 45.49 亿年), 即地球年龄约为 45 亿年。这与学术界公认的地球年龄值基本吻合, 说明生长线 - 日长定年法立论有据。

地球在 45 亿年的演化历程中体积略有膨胀, 但地球半径的变化很小。这样, (1)式中的角速度 ω 可以换用线速度 V 表示; 如进一步取 A 为 4500 Ma (45 亿年), (1)式即可改写成地层时代(地层的绝对年龄)的计算公式:

$$4500 = T_x V_x / (V_x - V_q) \quad (2)$$

式中, T_x 的含义和单位同(1)式, V_x 为某地质时间点地球自转的线速度, 单位: km/h; V_q 为现今地球自转的线速度, 单位: km/h。 V_q 可通过天文台的观测和计算得到。这样, (2)式内尚有 2 个变量, 知道其中 1 个即可算出另一个。若能由化石生长线 - 日长的研究得到 V_x , 将之代入(2)式, 即可计算求得 T_x 的值, 定出含化石地层的绝对年龄。若能用放射性同位素方法测得地层的绝对年龄 T_x , 即可计算求得当时地球的 V_x 值, 进而得知该地层中化石的生长线理论上应该具有的总条数, 对已被模糊、变形或改造了的生长线进行识别与判断, 使生长线图谱精确化和精细化, 成为古生物研究的辅助手段。

3. 元古代叠层石地层的定年实例

我国华北的元古界分布广泛, 天津的蓟县剖面是举世闻名的元古界经典剖面, 研究程度较高且涵盖各个方面。本节将以生长线 - 日长定年法重点审视华北元古界叠层石和同位素年龄的研究成果, 分析两者不一致的原因并提出合理的优选方案。

3.1. 铁岭组叠层石地层

屈原皋等(2004)基于北京周口店元古界铁岭组叠层石的研究, 认为大约 1000 Ma 之前地球的一年有 512 ± 20 天, 日长为 16.99 ± 0.66 小时[4]。我们可以对这 3 个数据分别进行计算, 再作比较和优选。

1) 取铁龄组“大约 1000 Ma”, 得到的计算结果是: 当时的日长为 18.6 h, 与化石生长线指示的日长相差 1 小时以上。具体的计算过程如下。按屈文, 当时的地球 1 年有 8745.013 h; 地球赤道周长 40029.896 km; 地球现今赤道线速度 1674 km/h。代入(2)式, 得:

$$4500 \text{ Ma} = 1000 \text{ Ma} V_x / (V_x - 1674 \text{ km/h}), \quad 3.5V_x = 4.5 \times 1674 \text{ km/h},$$

即: $V_x = 2152.286 \text{ km/h}$; 日长 = $40029.869 \text{ km} / 2152.286 \text{ km/h} = 18.6 \text{ h}$

2) 取当时“地球一年有 512 ± 20 天”, 得到的日长在 16.22 h~17.08 h~17.77 h 范围内。具体的计算过程是: 日长选 $16.99 + 0.66 \text{ h}$, 即每天 17.65 h; $V_x = 40029.896 \text{ km} / 17.65 \text{ h} = 2267.9828 \text{ km/h}$ 。代入(2)式, 得:

$$4500 \text{ Ma} = T_x \times 2267.9828 / (2267.9828 - 1674);$$

$$T_x = 4500 \text{ Ma} / 3.8183 = 1178.5 \text{ Ma}$$

这个结果较屈文认为 1000 Ma 的年龄值略大。

3) 取“日长为 16.99 ± 0.66 小时”, 得到的结果为 1300 Ma~1286 Ma~1178.5 Ma。如前所述, 如果当时 1 年有 512 天, 日长是 $8745.896 / 512 = 17.08 \text{ h}$ 。

如果当时的日长为 $16.99 + 0.66 \text{ h}$, 即 17.65 h, 对应的铁岭组年龄为 1178.5 Ma。本文认为这一日长-年龄组合为优选组合。因为日长数据直接来自于化石生长线, 计算结果是第一手数据, 可信度最高。此外, 它与其它证据提出的铁岭组年龄约 10 Ma、或略大于 10 Ma 的认识相一致; 这一结果的精度也落在屈文所限定的误差范围内。已有研究指出京津地区的元古界铁岭组的同位素年龄为 $1070 \pm 10 \text{ Ma}$ ~ $1175 \pm 10 \text{ Ma}$ [5]。它和本文的计算结果 1178.5 Ma 非常接近。

3.2. 雾迷山组叠层石地层

朱士兴等(2002)研究了中元古代蓟县系雾迷山组的叠层石, 认为大约 1300 Ma 前, 地球自转一昼夜最多只需要 16.05 小时[6]。

按本文提出的生长线-日长定年法, 如果以“大约 1300 Ma”为参变量代入(2)式, 得到的日长值是 17.15 小时, 这比朱文认为的 16.05 h 长了 1.1 h, 误差量较大。如果选取叠层石上的生长线记录的日长 16.05 h 作为参变量代入(2)式, 得到对应的地质年代 T_x 等于 1479.6 Ma, 比朱文提出的 1300 Ma 大了 179.6 Ma。

高志林和苏文博在 2007~2010 年间, 用 SHRMP U-Pb 方法测定北京西山雾迷山组的绝对年龄值, 结果为 1450~1550 Ma [7] [8]。李怀坤等(2014)在天津蓟县剖面雾迷山组上部第四亚组(闪坡岭亚组)取样, 得到 SHRIMP U-Pb 同位素年龄为 $1487 \pm 16 \text{ Ma}$ [9]。这些结果与本文通过(2)式计算得到的 1479.6 Ma 的年龄值较为吻合。因此, 将原称“大约 1300 Ma”的含叠层石的雾迷山组的地层年代改为约 1480 Ma 更接近客观实际, 那时地球的日长是每天 16.05 小时。这一实例说明: 由于化石上保存的生长线基本不受后期变质-热事件的影响, 用之计算得到的年龄值, 准确性可能要高于用同位素定年法得到的地层时代年龄。

3.3. 纠正 Arbab 的错误解读

Zhu *et al.* (2002) [10]在一篇研究叠层石的英文文章中曾推断该叠层石生长的时期地球一年有 540 天以上, 一天有 15 个小时。Arbab (2009)在他的文章[11]中引用了朱士兴等的这 2 个数据并代入他的经验公式, 得到的结论是: 该叠层石生活在距今 1819 Ma 之前, 那时一年有 583 天。目前国内的前寒武系研究

倾向于将长城系的底界置于 1800 Ma [12]。1819 Ma 对应的是溥沱群上部的变质岩层, 不可能有叠层石发育。Arbab 过分相信了他的经验公式, 对朱士兴等的成果作了错误的解读。

笔者用生长线-日长定年法对 Arbab 引用的这 2 个数据进行分析。1) 若该叠层石生活的时期“地球的一年有 540 天”, 利用(2)式可计算得到含该叠层石地层的地质年龄是 1453 Ma, 属于中元古界雾迷山组。2) 若“一天有 15 小时”, 用(2)式求得对应的地质时代为 1677 Ma, 属于蓟县系底部或长城系顶部的地层。朱士兴等(2002)在其文章[6]中认为: 由叠层石生长线得到地球自转一周的日长“最多只需要 16.05 小时”。Arbab [11]引用的数据是“一天有 15 小时”, “没有强调”最多 16.05 小时”这一前提(这两者间的差值达 1 小时), 故用其经验公式算出了 1819 Ma 的年龄值。

3.4. 与潮汐研究结果的对比

潮汐确切无误地记录了地球昼夜的变化(早晨涨水谓“潮”, 晚上涨水称“汐”)。Sonett *et al.* (1996) 在研究晚元古代 - 古生代沉积岩时, 根据保存在海相地层中的沉积构造和韵律探求当年的潮汐发生规律, 通过分析地 - 月距离变化和引力与潮汐的关系, 提出距今 900 Ma 时, 地球的日长近似于 18 小时[13]。

将 900 Ma 代入本文提出的(2)式, 得到当时地球的日长为 19.13 h。与 Sonett *et al.* 根据潮汐计算求得的日长约为 18 h 相比, 两者相差约 1 个小时。因为据沉积构造和韵律研究潮汐和叠层石生长线的研究都处于起步阶段, 两者能有如此接近的结果应该说是一件令人振奋的事。这一实例也说明: 据大时间跨度(晚元古代 - 古生代)的沉积地层中记录的潮汐信息来反推当时的日长得到的结果可能误差较大, 化石生长线 - 日长定年法可以校验和补充潮汐研究的成果。

4. 在新生界研究中的运用实例

4.1. 原称的中新世珊瑚

Dixon (1998)在其著作[14]中, 曾述及中新世的珊瑚化石显示其生活时代距今大约 10 Ma, 当时地球一年有 366 天。

按上述方法可分别处理分析这 2 个数据。当地质年代 $T_x = 10$ Ma 时, 由(2)式得到当时 1 年的天数是 366.52 天。如果 1 年有 366 天, 通过(2)式可知道对应的地质年代为 3.62 Ma。根据 20 世纪 90 年代美国地质学会实行的标准[15], 该时间为上新世早期, 不是中新世。由上述分析可得知 3 个认识。1) 地层年代“大约 10 Ma”这个近似值显然误差范围较大。2) 对 1 年有 366.52 天还是 366 天, 目前靠化石生长线的鉴定尚难以达到区分这两者的精度。由于 10 Ma 的误差范围较大, 据之得到的 366.52 天也只能是近似值; 相对而言, 366 天可能更接近客观真理。3) 今后如能获得较精确的地层年龄, 可求得精确的日长时间; 目前只能以化石证据为准, 认为该珊瑚化石的时代为 3.62 Ma, 当时的 1 年有 366 天。

4.2. 新生代各时期的日长

表 1 列出了新生代各时期 1 年的总天数(由 370 天至 366 天)、日长、地球赤道的自转线速度、距今年龄和相对应的地层时代。它们都是用(2)式计算所得的结果, 希望能在未来得到新的同位素年龄值和化石生长线研究成果的验证、补充和修正。

5. 计算日长 - 地层年龄的经验公式

笔者在查阅前人大量文献的基础上, 选取具代表性的 13 个不同时代(古生代 - 中生代)的化石样品, 据化石生长线得到的日长及含该化石地层的同位素年龄值, 用统计方法得到一个高拟合度的回归直线, 如图 1 所示; 其线性回归方程为 $Y = 23.9417 - 0.00543X$ 。式中, Y (纵坐标)为日长, 单位: h; X (横坐标)为

Table 1. The day-longs recorded by fossil's growth lines and relevant stratigraphic ages during Cenozoic
表 1. 新生代各时期化石生长线记录的日长及所对应的地层时代

1 年总天数/d	370	369	368	367	366	备注
日长/h	23.635	23.699	23.764	23.828	23.8935	8745.013 小时/一年天数
赤道自转线速度/km/h	1693.67	1698.096	1684.476	1679.95	1675.35	40029.896 km/日长
距今/Ma	52.23	40.22	27.99	15.94	3.62	据(2)式计算得到
地层时代	始新世早期	始新世中期	渐新世中期	中新世中期	上新世早期	据美国地质学会标准[15]

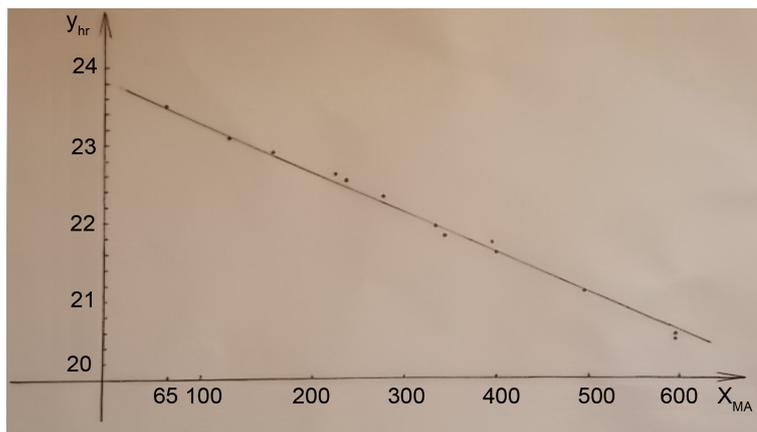


Figure 1. A regression line drawn by day-longs vs. stratigraphic ages based on Palaeozoic-Mesozoic data
图 1. 据古生代 - 中生代化石的生长线作出的日长 - 地层时代的回归直线

地层年龄或距今的时间，单位：Ma。此回归方程实际上是据古生代 - 中生代化石的生长线得到的计算日长 - 地层年龄的经验公式。

如果我们将 X 的取值范围从 65~600 Ma 的区间加以扩展，向新生代扩展至今天(0 Ma)，向远古扩展到地质时期的开始(4500 Ma)，即可包括地球自转速度衰减的全部历史时期。尽管取值边界改变，这两者仍可构成 1 条回归直线，仅其截距和斜率略有变化。现有的资料表明：新回归直线的截距为 23.912，相应的斜率为-0.0052。代表这一直线的回归方程即是计算日长 - 地层年龄的经验公式：

$$Y = 23.912 - 0.0052X \tag{3}$$

这个经验表达式中只有 2 个变量。只要知道化石的生长线指示的日长，代入(3)式即可得到含该化石地层的绝对年龄；反之，测得了地层的绝对年龄值，即可推知该层位中赋存的化石理论上应有多少条生长线。它的优点是能快速、便捷地计算日长或地层年龄。

要注意的是：不能用(3)式去计算地球年龄。因为在构成这个经验公式的截距和斜率时，已经包含有地球年龄是 4500 Ma 的先定条件。这与(2)式形成的情况一样，先据古生代 - 中生代的日长资料计算出地球年龄约为 4500 Ma，再将地球年龄作为已知数，然后确定其它 2 个未知变量(地层年龄和日长)中的 1 个，即可求取另一个变量的值。

下面将在上文中论述过的新生界和元古界的实例中各取 1 例，用(3)式重新计算，并将结果与用(2)式计算的结果进行比较。

例 1, Dixon 原称中新世[14]的珊瑚，其化石上的生长线表明当时的地球 1 年有 366 天，日长为 8745.013 h/366 d = 23.8935 h/d。此即 Y 值，代入(3)式，得到 23.8935 = 23.912 - 0.0052X，X = 3.5577 Ma，进一步

确认其生活时代为上新世。对比表 1 中的 366 天栏目, 通过(2)式得到的地层年龄是 3.62 Ma, 两者相差 0.0623 Ma。

例 2, 朱士兴等[6]认为大约 1300 Ma 前, 地球自转一周最多需要 16.05 小时。此即日长(Y), 代入(3)式求叠层石赋存的地层年龄: $16.05 = 23.912 - 0.0052X$, 得 $X = 1511.9231$ Ma。上文中, 通过(2)式计算得到的地层年龄是 1479.6 Ma, 两者相差 32.32 Ma。

当然, 本文提出的(3)式, 仅是依据现有的化石生长线的研究成果而构建的。相信随着化石生长线研究成果的积累和增多, 该经验公式的截距和斜率还可能得到修改并构成新的经验公式, 其计算结果会与通过(2)式计算的结果更接近。

6. 结束语

生长线 - 日长定年法的立论基础, 是地史期间地球自转的速度近于匀速地衰减。后者现已成为天文界和地球科学界的主流学术思潮, 得到普遍赞同。如英国皇家学会数学物理分会在 2016 年的学报中报告说, 在过去的 2700 年里, 地球的自转速度每 100 年降低 1.8 毫秒[16]。这说明本文的立论基础可信。

相应地球自转速度的变慢, 地球 1 年的天数变少, 日长增加。构建起地球年龄、地层时代和地球自转速度(日长)这三者的函数关系后, 即可据化石生长线记录的日长来推定地层的年龄。这就是本文提出的生长线 - 日长定年法。运用(2)式计算地层年龄实际上分 2 步进行。第一步是选定地球年龄为 4500 Ma 或 4549 Ma (据化石记录丰富和同位素定年资料可靠的古生代 - 中生代样品的数据用(1)式算出), 第二步是选定生长线指示的日长结果, 即可计算出含该化石地层的绝对年龄。

本文列举的以(2)式计算的元古界地层年龄及其与前人成果的对比证明: 生长线 - 日长定年法对分析判断叠层石记录的日长和叠层石赋存地层的绝对年龄有较好的效果。结合新生界实例的剖析, 表明本方法可以发现前人工作中的疏漏和不足。因其成本低廉, 易于操作, 可作为同位素定年法测定绝对年龄值的一种验证和补充, 对没有化石但发育有潮汐韵律的古老地层的定年尤其有实用价值。与潮汐等其他方法得到的结果有相似性, 指示该方法对验证地球自转的天文物理模型也有积极作用。

本文的实例也反映出生长线 - 日长法计算的结果与同位素定年得到的年龄值可能有一定差别。原因之一是在野外, 采集的化石标本和用作绝对年龄测定的岩石样品, 实际上是经常既不在同一地点、也不严格地限于同一层位内的, 这客观上决定了生长线-日长法推定的地层时代与同位素年龄之间必然存在误差。原因之二是受化石标本所限(保存不完整, 或发生变形等), 生长线本身提供的信息有误差范围。如上文中讨论的铁岭组, 目前的认识是其沉积时 1 年有 512 ± 20 天, 相应的日长为 16.99 ± 0.66 小时, 据之可得到 3 个年龄值: 1300 Ma, 1286 Ma 和 1178.5 Ma。即使取这三者的算术平均值 1250 Ma 作为周口店地区铁岭组含叠层石的年龄, 仍比李明荣等[5]实测的铁岭组同位素年龄值大 180 ± 10 Ma~ 75 ± 10 Ma。

简言之, 作为一种简单便捷的定年新方法, 生长线 - 日长定年法既有一定的发展前景, 又极需得到深化和完善。今后尤其需要在获取第一手资料上下功夫, 用新技术手段和装备(如 3 维扫描等)来武装自己, 得到化石上保存的生长线的确切而详尽的可靠信息。

参考文献 (References)

- [1] 尹赞勋, 骆金锭. 从天文观测和生物节律论证古生物钟的可靠性[J]. 地质科学, 1976(1): 1-6.
- [2] Benson, H. (1991) Textbook of Physics. John Wiley & Sons, New York, 239.
- [3] 印度报业托拉斯网站. 月球至少有 45.1 亿岁. 参考消息, 2017 年 1 月 16 日第 7 版.
<http://www.cankaoxiaoxi.com/science/20170116/1615044.shtml>
- [4] 屈元皋, 解古磊, 龚一鸣. 10 亿年前的地 - 日 - 月关系: 来自叠层石的证据[J]. 科学通报, 2004, 49(20): 2083-

2089.

- [5] 李明荣, 王松山, 裘冀. 京津地区铁岭组、景儿峪组的海绿石 ^{40}Ar - ^{39}Ar 年龄[J]. 岩石学报, 1996, 12(3): 416-433.
- [6] 朱士兴, 黄学光. 13 亿年前叠层石的生长节律和地-日-月动力学[J]. 微体古生物学报, 2002, 20(1): 23-30.
- [7] 高志林. 中国科学报网: <http://www.365geo.com/372.html>.
并见科学网: <http://blog.sciencenet.cn/blog--75099--690770.html>
- [8] 苏文博. 新华网. http://news.xinhuanet.com/local/2013-07/18/c_116589311.htm
- [9] 李怀坤, 苏文博, 周红英, 等. 中-新元古界标准剖面蓟县系首获高精度年龄制约——蓟县剖面雾迷山组和铁岭组斑脱岩锆石 SHRIMP U-Pb 同位素定年研究[J]. 岩石学报, 2014, 30(10): 2999-3012.
- [10] Zhu, S.X., Huang, X.G. and Xin, H.H. (2002) *Proceeding of the 80th Anniversary of the Chinese Geological Society*, Geological Publishing House, Beijing.
- [11] Arbab, A.I. (2009) The Length of the Day: A Cosmological Perspective. *Progress in Physics*, **1**, 8-11.
- [12] 高志林, 丁效忠, 庞维华, 等. 中国中新元古代地层年表的修正——锆石 U-Pb 年龄对年代地层的制约[J]. 地层学杂志, 2016, 35(1): 1-7.
- [13] Sonett, C.P., Kvale, E.P., Zakharian, A., Chan, M.A. and Demko, T.M. (1996) Late Proterozoic and Paleozoic Tides, Retreat of the Moon, and Rotation of the Earth. *Science*, **273**, 100-104. <https://doi.org/10.1126/science.273.5271.100>
- [14] Dixon, C. (1998) Paleozoic Calendars. <http://www.hevanet.com/>
- [15] Montgomery, C.W. (1990) *Physical Geology*. C. Brown Publishers, Dubuque, Iowa, 164.
- [16] Proceedings of the Royal Society A. <https://doi.org//10.1098/rspa.2016.0404>

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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

期刊邮箱: ag@hanspub.org