

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.801>



如何打造高精度地质时间轴?

沈树忠, 樊隽轩, 王向东, 张飞飞, 史宇坤, 张书涵

南京大学地球科学与工程学院, 内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 关键地球物质循环前沿科学中心, 江苏南京 210023

1 问题的提出

时间和空间是物质存在的基础; 没有时间, 就没有速率. 地球经历了大约 45 亿年的演化历史, 留下了无数的地质记录, 要完整地理解地球的发展历程, 地质时间是现有唯一的共同语言. 近两百多年以来, 地质学家们一直在探索如何恢复地球演变历史. 18 世纪生物化石层序律的提出为构建地质时间提供了重要的理论基石 (Schneer and Yochelson, 1989), 结合岩石地层 (Lithostratigraphy)、旋回地层 (Cyclostratigraphy)、化学地层 (Chemostratigraphy)、磁性地层 (Magnetostratigraphy)、地质年代学 (Geochronology) 的进展, 至 20 世纪 60 年代将地层学与地质时间的研究推向一个新的阶段. 为解决不同地区、不同专家、不同方法在年代地层标定和划分时的分歧, “国际地层委员会” (International Commission on Stratigraphy, ICS) 成立, 其目标就是建立全球通用的年代地层标准, 也就是地质时间标尺.

能够在全世界范围内识别的最低一级年代地层单位为阶 (Stage). 经过反复讨论, 国际地层委员会决定采用全球界线层型剖面 and 点位 (Global Stratotype Section and Points, GSSP, 俗称“金钉子”) 这一方法界定地质时间界线, 也就是用可清楚标识一个阶一级单元界线层位 (点), 且地层连续发育, 并可用于广泛对比的典型剖面, 作为标定阶底界的全球标准. 原始的“金钉子”概念仅适用于显生宙地层, 通常以一个生物演化序列中的后裔种的首次出现

作为第一标准来定义. 自从第一个“金钉子”于 1972 年建立以来 (Chlupáč *et al.*, 1972), 主要以化石首现为标志的“金钉子”工作大规模展开, 目前 102 个“金钉子”中已有 78 个被正式批准, 取得了令世界瞩目的成就.

除了以标志化石的首现为第一标准, 现在“金钉子”的确立通常还需要有其他化石以及地球化学、古地磁信号等辅助标志, 需要有同位素年龄标定, 不受岩相控制, 在区域和全球均可进行地层对比等等. 然而, 在“金钉子”工作取得突出进展的同时, 国际地层委员会也越来越多地认识到“金钉子”的确立存在一些难于解决的困难: (1) 由于化石记录普遍不完整, 事实上无论如何工作都不可能找到一个化石物种的首现点, 先前定义的“金钉子”层位会被后续发现的标志化石物种的更早“首现”层位所打破. (2) 由于生物化石分布的局限性, 定义“金钉子”的标志化石在洲际间或不同岩相区对比时, 时常存在困难. (3) 因研究者所从事的化石门类不同而异, 通常更多地强调自己所从事门类的对比价值, 容易主观强调一个剖面上某一化石的出现, 而其他标志和其他剖面上的非标志化石相对被轻视甚至弃用. (4) 生物地层定义的“金钉子”与许多具有等时意义的物理、化学标志层 (例如: 火山灰层、同位素地球化学突变等) 存在诸多矛盾. (5) 现在定义的“金钉子”都采用了海相剖面作为标准剖面, 难于解决陆相地层的对比问题.

国际地层委员会将所有“金钉子”以及全球年

作者简介: 沈树忠 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事地层古生物学和生物宏演化等研究. E-mail: szshen@nju.edu.cn

引用格式: 沈树忠, 樊隽轩, 王向东, 张飞飞, 史宇坤, 张书涵, 2022. 如何打造高精度地质时间轴? 地球科学, 47(10): 3766—3769.

Citation: Shen Shuzhong, Fan Junxuan, Wang Xiangdong, Zhang Feifei, Shi Yukun, Zhang Shuhan, 2022. How to Build a High-Resolution Digital Geological Timeline? *Earth Science*, 47(10): 3766—3769.

代地层信息进行了汇总,通过《国际年代地层表(International Chronostratigraphic Chart)》(<https://stratigraphy.org/chart>)来每年公布和更新,此外,还有 Gradstein *et al.* (2012, 2020) 每 4 年更新出版的《Geologic Time Scale (GTS)》,代表了目前地球科学领域广泛使用的年代地层标准.在此基础上的数字化的国际年代地层表已经建立(Ma *et al.*, 2012),信息更新更加快捷.但是,上述提及的工作困难依然存在,并且“金钉子”的定义以阶一级单元为标准,时间跨度以百万年计,难以满足地球科学界对地质时间越来越高精度的需求.

2 核心思想

任何地质记录都具有时间和空间的属性,理论上都具有用来进行时空对比的价值.近年来,随着分析测试技术的不断发展,尤其是高精度同位素定年技术(如同位素稀释-热电离质谱方法, ID-TIMS) (Burgess *et al.*, 2014; Wang *et al.*, 2016; Zhong *et al.*, 2021)、化学地层学(Weissert *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2013)、磁性地层学(Zhang *et al.*, 2021)和天文旋回地层学(Wu *et al.*, 2013; Li *et al.*, 2016)等的快速发展,使得许多原先没有得到足够重视的物理、化学标志层(例如火山灰层、同位素地球化学突变标志、磁极性变化标志等),越来越凸显其全球等时意义.并且我们所能测定的地质年龄精度也越来越高,如很多 ID-TIMS 年龄的精度已经超过了传统化石带可识别的时间分辨率.目前,国际年代地层表中已经开始采用地球化学突变标志(Molina *et al.*, 2006; Aubry *et al.*, 2007)、磁极性带(Schmitz *et al.*, 2011; Saganuma *et al.*, 2021)来定义“金钉子”,有人甚至提出在显生宙像前寒武纪一样用高精度同位素年龄值定义“金钉子”(Davydov, 2020).

但是,随着全球被研究的地层剖面数量不断增加,国际地层委员会各个分会在进行大规模的地层对比,建立更为精准的地质年代标准时遇到了越来越多的困难,传统的人为对比方法难以解决其中存在的矛盾.地球科学是一门系统科学(汪品先等, 2018),地球各个圈层存在相互作用和耦合,更加全面地考虑所有的地质记录,探索其潜在的内在联系,使用这些地质记录构建出一个统一、完整的深时时间标尺,可能是一个合适的解决路径.21 世纪

的人类已经进入了大数据和人工智能应用时代(Guo, 2017; Wang *et al.*, 2021),我们认识到,通过地质学大数据建设,打造高精度的新一代地质时间轴是年代地层学工作中的一个亟需解决的新使命,也是摆在地层古生物学者面前的一个科学难题,需要研究范式的革新.

这一地质时间轴计划应具有以下特点:(1)以全球地层数据库为支撑,全面收集所有包含化石记录的地层剖面,数据一旦进入数据库,永久保存,随时调用,充分利用所有化石记录的对比价值;(2)应用统计学、人工智能算法等(Sadler *et al.*, 2009; Fan *et al.*, 2020),对化石的不完整性进行优化校正,获得地层学信息排序的统计学最优解;(3)与地质年代数据、磁性地层数据、化学地层数据和旋回地层数据相结合(图 1),使得各剖面之间对比达到最优化,大幅提高对比精度;(4)可以随时更新,最终实现实时生成任意时段的地质时间轴.这一数字化地质时间轴一旦建立,将彻底改变目前国际地层委员会使用的《国际年代地层表》和 GTS 中精度只到阶和化石带一级的简表水平.

3 科学性和潜在影响力

通过地球科学、信息科学领域的深度交叉融合,可望在地学大数据、地学知识图谱等方面获得创新突破(Wang *et al.*, 2021).高精度地质时间轴的设想一旦实现,其精度将比现有的《国际年代地层表》提高百倍以上,而且,随着数据的增加,精度会越来越高,最大程度克服人为主观因素,会根本性地改变对地球历史中所发生的各种地质事件的认识.因此,建立高精度的地质时间轴对于深时系统地球科学研究具有十分重要的科学意义和实用价值.主要表现在:(1)促进对地质历史时期重大事件,特别是突发事件(例如:二叠纪末生物大灭绝、石炭二叠纪大冰期中的快速变暖事件、古新世/始新世极热事件(PETM)等)发生的时间、速度和速率等的定量化研究(例如: Burgess *et al.*, 2014; Gutjahr *et al.*, 2017; Chen *et al.*, 2022);(2)推动综合利用沉积地球化学等环境指标大数据,与高精度的现代系统地球科学研究模式(例如:LOSCAR, cGENIE, CESM 等)对标,开展深时重大地质事件的数字化模拟(Penn *et al.*, 2018; Zhu *et al.*, 2019; Penn and Deutsch, 2022);(3)重建重大地质事件背景下的高分辨率生物多样性变化曲线(Fan *et al.*, 2020; Deng *et al.*, 2021),更深刻地理

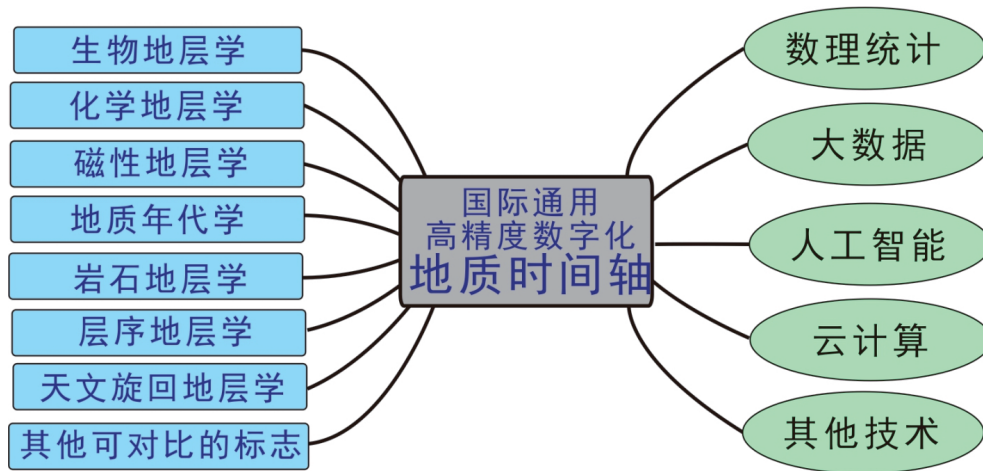


图1 建立国际高精度数字化地质时间轴的概念与方法

解关键时期的生物多样性变化趋势;(4)开展高分辨率的沉积矿产时空分布研究(Fan *et al.*, 2013; Hou *et al.*, 2019; Hou *et al.*, 2020),为资源勘查提供更为精细的背景参照.高精度地质时间轴的建立,将为精时框架下的深时系统地球科学研究开辟新的研究范式,并可望在此基础上推动和加深生命演化、物质演化、地理演化、气候演化等方面的研究,取得创新性研究成果.

4 发展前景

随着生物地层、旋回地层、化学地层、磁性地层、同位素地质年代学的大量数据积累,数据挖掘、云计算等技术的发展使得数据能够自动获取,硬件升级使得大规模数据库建设以及在线访问成为可能.加上许多新的数理统计与人工智能算法不断从理论到实践的创新,结合这些算法以及超算平台提供的本地或云计算,就能实现对地层学数据的不断实时获取、整合、计算以及在线发布.随着以上这些理论及技术上的进步,高精度地质时间轴的建立以及实时更新可以逐步得到实现.

参考文献

- Aubry, M.P., Ouda, K., Dupuis, C., et al., 2007. The Global Standard Stratotype-Section and Point (GSSP) for the Base of the Eocene Series in the Dababiya Section (Egypt). *Episodes*, 30(4): 271–286. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2007/v30i4/003>
- Burgess, S.D., Bowring, S., Shen, S.Z., 2014. High-Precision Timeline for Earth's most Severe Extinction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(9): 3316–3321. <https://doi.org/10.1073/pnas.1317692111>
- Chen, J.T., Montañez, I.P., Zhang, S., et al., 2022. Marine Anoxia Linked to Abrupt Global Warming during Earth's Penultimate Icehouse. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 119(19): e2115231119. <https://doi.org/10.1073/pnas.2115231119>
- Chlupáč, I., Jaeger, H., Zikmundova, J., 1972. The Silurian-Devonian Boundary in the Barrandian. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 20(1):104–174.
- Davydov, V.I., 2020. Shift in the Paradigm for GSSP Boundary Definition. *Gondwana Research*, 86: 266–286. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2020.06.005>
- Deng, Y.Y., Fan, J.X., Zhang, S.H., et al., 2021. Timing and Patterns of the Great Ordovician Biodiversification Event and Late Ordovician Mass Extinction: Perspectives from South China. *Earth-Science Reviews*, 220: 103743. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103743>
- Fan, J.X., Chen, Q., Melchin, M.J., et al., 2013. Quantitative Stratigraphy of the Wufeng and Lungmachi Black Shales and Graptolite Evolution during and after the Late Ordovician Mass Extinction. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 389: 96–114. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2013.08.005>
- Fan, J.X., Shen, S.Z., Erwin, D.H., et al., 2020. A High-Resolution Summary of Cambrian to Early Triassic Marine Invertebrate Biodiversity. *Science*, 367(6475): 272–277. <https://doi.org/10.1126/science.aax4953>
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., et al., 2020. *Geologic Time Scale 2020*, Volumes 1, 2. Elsevier, Amsterdam, Oxford, Cambridge.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Schmitz, M.D., et al., 2012. *The Geologic Time Scale*. Elsevier, Amsterdam.
- Guo, H.D., 2017. Big Data Drives the Development of Earth

- Science. *Big Earth Data*, 1(1–2): 1–3. <https://doi.org/10.1080/20964471.2017.1405925>
- Gutjahr, M., Ridgwell, A., Sexton, P. F., et al., 2017. Very Large Release of Mostly Volcanic Carbon during the Palaeocene–Eocene Thermal Maximum. *Nature*, 548(7669): 573–577. <https://doi.org/10.1038/nature23646>
- Hou, M. C., Chen, A. Q., Ogg, J. G., et al., 2019. China Paleogeography: Current Status and Future Challenges. *Earth–Science Reviews*, 189: 177–193. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.04.004>
- Hou, Z. S., Fan, J. X., Henderson, C. M., et al., 2020. Dynamic Palaeogeographic Reconstructions of the Wuchiapingian Stage (Lopingian, Late Permian) for the South China Block. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 546: 109667. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109667>
- Li, M. S., Huang, C. J., Hinnov, L., et al., 2016. Obliquity–Forced Climate during the Early Triassic Hothouse in China. *Geology*, 44(8): 623–626. <https://doi.org/10.1130/g37970.1>
- Ma, X. G., Carranza, E. J. M., Wu, C. L., et al., 2012. Ontology–Aided Annotation, Visualization, and Generalization of Geological Time–Scale Information from Online Geological Map Services. *Computers & Geosciences*, 40: 107–119. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.07.018>
- Molina, E., Alegret, L., Arenillas, I., et al., 2006. The Global Boundary Stratotype Section and Point for the Base of the Danian Stage (Paleocene, Paleogene, “Tertiary”, Cenozoic) at El Kef, Tunisia–Original Definition and Revision. *Episodes*, 29(4): 263–273. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2006/v29i4/004>
- Penn, J. L., Deutsch, C., 2022. Avoiding Ocean Mass Extinction from Climate Warming. *Science*, 376(6592): 524–526. <https://doi.org/10.1126/science.abe9039>
- Penn, J. L., Deutsch, C., Payne, J. L., et al., 2018. Temperature–Dependent Hypoxia Explains Biogeography and Severity of End–Permian Marine Mass Extinction. *Science*, 362(6419): eaat1327. <https://doi.org/10.1126/science.aat1327>
- Sadler, P. M., Cooper, R. A., Melchin, M., 2009. High–Resolution, Early Paleozoic (Ordovician–Silurian) Time Scales. *Geological Society of America Bulletin*, 121(5–6): 887–906. <https://doi.org/10.1130/b26357.1>
- Schmitz, B., Pujalte, V., Molina, E., et al., 2011. The Global Stratotype Sections and Points for the Bases of the Selandian (Middle Paleocene) and Thanetian (Upper Paleocene) Stages at Zumaia, Spain. *Episodes*, 34(4): 220–243. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2011/v34i4/002>
- Schneer, C., 1989. Geology, Time and History. *Earth Sciences History*, 8(2): 103–105. <https://doi.org/10.17704/eshi.8.2.n871088718k50220>
- Shen, S. Z., Cao, C. Q., Zhang, H., et al., 2013. High–Resolution $\delta^{13}\text{C}$ Carb Chemostratigraphy from Latest Guadalupian through Earliest Triassic in South China and Iran. *Earth and Planetary Science Letters*, 375: 156–165. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2013.05.020>
- Suganuma, Y., Okada, M., Head, M. J., et al., 2021. Formal Ratification of the Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the Chibanian Stage and Middle Pleistocene Subseries of the Quaternary System: The Chiba Section, Japan. *Episodes*, 44(3): 317–347. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2020/020080>
- Wang, C. S., Hazen, R. M., Cheng, Q. M., et al., 2021. The Deep–Time Digital Earth Program: Data–Driven Discovery in Geosciences. *National Science Review*, 8(9): nwab027. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab027>
- Wang, T. T., Ramezani, J., Wang, C. S., et al., 2016. High–Precision U–Pb Geochronologic Constraints on the Late Cretaceous Terrestrial Cyclostratigraphy and Geomagnetic Polarity from the Songliao Basin, Northeast China. *Earth and Planetary Science Letters*, 446: 37–44. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.04.007>
- Weissert, H., Joachimski, M., Samthein, M., 2008. Chemostratigraphy. *Newsletters on Stratigraphy*, 42(3): 145–179. <https://doi.org/10.1127/0078-0421/2008/0042-0145>
- Wu, H. C., Zhang, S. H., Hinnov, L. A., et al., 2013. Time–Calibrated Milankovitch Cycles for the Late Permian. *Nature Communications*, 4: 2452. <https://doi.org/10.1038/ncomms3452>
- Zhang, M., Qin, H. F., He, K., et al., 2021. Magnetostratigraphy across the End–Permian Mass Extinction Event from the Meishan Sections, Southeastern China. *Geology*, 49(11): 1289–1294. <https://doi.org/10.1130/g49072.1>
- Zhong, Y. T., Huyskens, M. H., Yin, Q. Z., et al., 2021. High–Precision Geochronological Constraints on the Duration of ‘Dinosaur Pompeii’ and the Yixian Formation. *National Science Review*, 8(6): nwab063. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwab063>
- Zhu, J., Poulsen, C. J., Tierney, J. E., 2019. Simulation of Eocene Extreme Warmth and High Climate Sensitivity through Cloud Feedbacks. *Science Advances*, 5(9): eaax1874. <https://doi.org/10.1126/sciadv.aax1874>
- 汪品先, 田军, 黄恩清, 2018. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社, 565.