

旋回地层学：地层学解读时间的第三里程碑

龚一鸣^{1,2}, 杜远生¹, 童金南¹, 张克信¹, 冯庆来¹, 谢树成¹, 胡 斌², 齐永安², 张国成²

1. 中国地质大学生物地质与环境地质教育部重点实验室, 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

2. 河南理工大学资源环境学院, 生物遗迹与沉积矿产河南省重点实验室, 河南焦作 454003

摘要: 围绕对地质时间的认识, 地层学取得了从岩石地层学、生物地层学和旋回地层学 3 次里程碑性的重大进展. 以生物地层学为基础并与放射性同位素定年技术相结合建立的、以百万年为计时单位的地质年代表既创造了地层学的辉煌, 也在一定程度上降低了地质学对精确数字定年的不懈追求和为人类社会服务的功能. 本文以时间为线索, 简要回顾了地层学解读时间的漫长过程, 阐述了旋回地层学概念的起源、形成和发展, 以及旋回地层学与层序地层学在科学目标、研究内容和研究方法上的异同. 以广西晚泥盆世弗拉期—法门期之交海相碳酸盐地层为例, 从理论与实践的结合上剖析了旋回地层学的研究方法以及在岩石地层学和生物地层学基础上构建高分辨率, 并能与人类社会时间接轨的地质时间坐标的广阔前景和科学意义.

关键词: 旋回地层学; 岩石地层学; 生物地层学; 时间; 米兰柯维奇旋回; 泥盆纪; 华南.

中图分类号: P534

文章编号: 1000-2383(2008)04-0443-15

收稿日期: 2007-10-29

Cyclostratigraphy: The Third Milestone of Stratigraphy in Understanding Time

GONG Yi-ming^{1,2}, DU Yuan-sheng¹, TONG Jin-nan¹, ZHANG Ke-xin¹, FENG Qing-lai¹,
XIE Shu-cheng¹, HU Bin², QI Yong-an², ZHANG Guo-cheng²

1. Key Laboratory of Biogeology & Environmental Geology of Ministry of Education, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Institute of Resources and Environment, Henan Key Laboratory of Biogenic Traces and Sedimentary Minerals, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China

Abstract: Focusing on understanding geological time, stratigraphy has made three milestone achievements characterized by lithostratigraphy, biostratigraphy and cyclostratigraphy. A geological time scale based mainly on both biostratigraphy and radiometric dating created stratigraphic refulgence, but at the cost of lowered accuracy and preciseness and weakened function of serving the human society. The paper briefly reviews the long history of stratigraphy in understanding geological time, expatiating on the origin, formation and development of cyclostratigraphical concepts, and on similarities and differences between cyclostratigraphy and sequence stratigraphy in the scientific objective, research content and method. Taking the Late Devonian Frasnian-Famennian transitional marine carbonate successions from Guangxi, South China as an example, the paper discusses the research method of cyclostratigraphy, and the prospect and scientific significance of cyclostratigraphy in establishing the high-resolution geological time scale which bridges the gap between the existing geological time coordinate with time unit of million-year scale and anthropological time units such as millennium, century and year, etc.

Key words: cyclostratigraphy; lithostratigraphy; biostratigraphy; time; Milankovitch cycle; Devonian; South China.

围绕地质时间坐标的建立, 地层学在 300 余年 想和方法的变革(图 1). 在这些变革中, 从解读地质
的知识创新与积累过程中, 经历了一系列地层学思 时间的角度看, 岩石地层学、生物地层学和旋回地层

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40472020, 40072041, 40621002); 高等学校学科创新引智计划项目(B08030); 长江学者创新团队发展计划项目(IRT0546); SINOPEC 项目(G0800-06-ZS-319).

作者简介: 龚一鸣(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事泥盆纪地层、遗迹化石和沉积地质研究. E-mail: ymgong@cug.edu.cn



图 1 地层学大事记

Fig. 1 Stratigraphic memorabilia

注: ①~⑦为转引文献编号, 分别转引吴瑞棠和王治平, 1994; 张守信, 1989; 王鸿祯, 1995; 龚一鸣等, 1996b; 朱筱敏, 2000; 金性春, 1984; Doyle and Bennett, 1998

学则是 3 次里程碑性的重大变革, 并且后一次变革总是对前一次变革的继承和发展, 使地质学对时间的认识逐步从无知→粗知→深知。本文将以时间为线索, 简要溯源地层学解读时间的漫长过程, 从理论与实例的结合上介绍、点评和例析旋回地层学。

1 岩石地层学与相对、直观时间概念的建立

尽管地质学家和演化生物学家是非常关注时间的人, 但他们很少舍得花时间思考时间的本质含义, 如时间的标志、相对性、可逆性和什么是现在的含义等 (Holland, 1986)。奥古斯丁曾幽默地指出: “时间究竟是什么? 没有人问我, 我倒清楚, 有人问我, 我想说明, 便茫然不了解。”时间的确对我们每个人来说是如此熟悉和简单的概念, 当我们真的试图要清楚地说明它的时候, 它又是如此的陌生和深奥, 即使是我们崇拜的伟大科学家牛顿和爱因斯坦, 哲学家 Bergson and Whitehead 也未能将时间都说清楚和正确。在科学的经典——牛顿力学 (1687) 中, 时间作为一个描述运动的参量, 是反演对称的, 把 t 换为 $-t$ 具有完全相同的结果, 这意味着过去与未来并无差别。20 世纪初爱因斯坦 (1905, 1916) 建立的相对论时空观, 革新了牛顿的静止、绝对的时空观, 成为人类时空认识史上的一次重要进展。在相对论的“四维时空连续体”中, 两个事件之间的时空间隔也是恒定的, 把 t 换为 $-t$ 也具有相同的结果, 在此意义上, 爱因斯坦仍然秉承了牛顿的可逆时间概念, 相对论与牛顿力学仍然属于同一范畴 (曾国屏, 2003)。老朋友 Besso 去世后, 爱因斯坦在给 Besso 的妹妹和儿子的深情寄语信中写道: “就我们这些受人们信任的物理学家而言, 过去、现在和将来之间的区别只是一种幻觉, 然而, 这种区别仍然持续着。”

克劳修斯的热力学第二定律和达尔文的生物进化论却给我们描述了另类时间, 即过去和未来是不能等同的, 是存在根本差别的。克劳修斯描绘的是“退化论”或令人可怕的“热寂说”自然图景, 达尔文描绘的则是“进化论”, 一幅蓬勃向上、生机盎然的自然图景。

在我们视为神圣的科学殿堂中, 如牛顿力学与热力学、热力学与生物学、生物学与牛顿力学、物理学与生物学, 和在我们崇拜的伟大科学家中, 如牛顿—爱因斯坦与克劳修斯、克劳修斯与达尔文、达尔文与牛顿—爱因斯坦, 对时间的认识竟是如此的相克而不相容、存在如此深刻的矛盾和对立; 我们熟悉的自然界中的时间 (演化) 和时间中的自然界 (存在) 竟是如此地让人难以琢磨。

然而这一切, 并没有阻碍地层学的产生和发展。

地层学从其产生之时就与时间结下了不解之缘,并用地层学特有的方式解读着地球和生物界漫长、遥远、已逝的时间记录。众所周知,过去—现在—将来是人们常用来描述时间的概念,在时间概念的核心层面上,用时间来说明时间,似乎说不清楚的比说得清楚的更多。如人们相信时间与一条从遥远过去($t \rightarrow -\infty$)延伸到遥远未来($t \rightarrow +\infty$)的直线同构(图2)。那么现在就对应于一个单个的点,它把过去和将来分隔开。可以说,现在从不知道的地方出现,又在不知道的地方消失。而且,既然现在被约化为一个点,那么,它就无限靠近过去,也无限靠近将来,在这种表示中,不仅过去与现在之间,现在与将来之间没有任何距离,就是过去与将来之间也不存在距离。过去—现在—将来之间无差别,是搅浑在一起的,这无异于说爷爷、父亲、孙子是一回事,我们谁都不会苟同这种对时间的认定,但我们确实又是这样表述和使用时间概念的。即使是在普里戈金批判这种时间的传统表示方式时,也没有跳出用时间概念表达时间概念的圈子(Prigogine, 1980)。

地层学则不然,它用上、下、左、右等空间概念来表达时间。早在1669年由丹麦学者 N. Steno 提出的地层学三定律(地层叠覆律、地层水平律和地层侧向连续律,即原始沉积的地层总是上新下老,侧向连续,产状水平)就是用地层的空间概念来表达地层的时间属性的典型代表。瓦尔特相律(Walther, 1894; 转引王鸿祯, 1995)则清楚地说明了空间与时间的关系,即在一定条件下,空间上的毗邻关系可转化为时间上的相随历史,在一定条件下,从时间上的相随历史也可推演出空间上的毗邻关系。地层叠覆律的提出显然早于牛顿的《自然哲学的数学原理》(1687)、达尔文的《物种起源》(On the origin of species)的出版(1859)和克劳修斯的热力学第二定律(The second law of thermodynamics)的提出(1850)以及爱因斯坦的狭义相对论(Special relativity)和广义相对论(General relativity)的建立(1905, 1916)。

地层学三定律(Steno, 1669; 转引吴瑞棠和王治平, 1994)第一次告诉人们岩石地层序列这个实实在在的对象与时间流这个令人难以捉摸的抽象概念之

间的联系,它第一次告诉人们如何从地层的空间关系辨识地质记录形成和地质作用发生的先后顺序。地层学三定律至今仍然是地层学乃至构造地质学的基石。然而,建立在这种早期岩石地层学基础上的时间概念难以建立全球范围内统一的地质时间坐标。

2 生物地层学与地质时间坐标的建立

建立在化石层序律(不同时代的地层所含化石不同,含有相同化石的地层其时代相同, Smith, 1796; 转引王鸿祯, 1995)基础上的生物地层学在岩石地层学的基础上,创立了将地层中的特征符号——所含化石作为指示时间先后顺序的标志,将地层实体时间属性的划分对比转变为地层所含化石的确定和对比,为跨相、跨区域和非连续出露乃至变形、变位、变质和局部或整体无序地层(非史密斯地层,冯庆来, 1993; 龚一鸣等, 1996a, 1996b; 杜远生等, 1997; 张克信等, 1997; 殷鸿福等, 1999)的等时对比和全球范围内统一地质时间坐标——地质年代表的建立奠定了科学的基础,提供了直观、简单、实用的操作方法,开创了用能独立于岩石地层本体之外的特征、标志和属性划分对比地层的先河。生物地层方法与放射性同位素定年技术的结合(图1),使相对的地质时间坐标有了“绝对”的数字年龄,并将其单位确定为百万年(Ma)。尽管生物地层方法与放射性同位素定年技术的结合给20世纪中后期至今的地质学或地球科学的发展创造了巨大的辉煌,也使地层学的发展步入了快车道。但在一定程度上也误导了人们对地质时间概念的精细思维,延缓了人们对建立高分辨率地质时间坐标的不懈追求。

众所周知,人们测量时间通常根据两类自然过程或事件。其一,受牛顿力学规律控制的地球—月球—太阳系统的运动,如我们熟悉的天、月、年以及岁差、斜度(黄赤交角)、偏心率周期等,这类时间就是牛顿力学所描述的恒久的、到处一样的、反演对称的和可以精确预测的“绝对时间”,即存在着的时间、没有箭头的时间。其二,自然现象的演变,如生物的生长演化、气候和地貌景观的变化以及温度和流体的扩散等,这类时间不可能制造出精确的“时间钟”,但过去和将来是根本不同的,这类时间的特征和规律服从进化论和热力学第二定律,即演化的时间、具有箭头的时间。

在这两类“计时器”中,均没有赋予百万年什么



图2 时间的传统表示(Prigogine, 1980; Holland, 1986)

Fig. 2 The traditional expression of time

特殊的含义和待遇。作为地层学时间拐杖的生物化石,似乎也与百万年没有什么特殊的关联。如现知物种生存周期最长的达数亿年之久(如腕足类的 *Lingula*),脊椎动物个体生命周期最短的仅 70 天(如非洲赤道附近的一种淡水鱼 *Nothobranchius furzeri* (4~6 cm 长))。早期由于躲避紫外线的需要,24 h 的生命节律可能是真核生命(eucaryotic life)的基本特征(Holland, 1986)。另外,地层叠覆律、化石层序定律和瓦尔特相律等也未限定地层学的时间单位应是百万年。因此,将百万年作为地层学和地质学的时间单位,不能不说是地层学的遗憾和盲从。将地质学的时间坐标单位选定为百万年,在一定程度上降低了地质学对精确性、严谨性的不懈追求,延缓了地层学和地质学的快速发展。地层学完全能从“存在的时间”和演化的时间中,依据客观规律和需要选定自己的时间坐标单位谱(如天、月、季、年、世纪、千年以及岁差、斜度、偏心率周期等),建立能与人类社会接轨的时间单位谱和地质学时间坐标(Gong *et al.*, 2004)。

令人高兴的是,轨道参数变化能影响行星地球气候和沉积记录以及在建立高分辨率地质时间坐标方面潜力的思想早在地层学发展的早期就已萌芽(Gilbert, 1895)。20 世纪初,前南斯拉夫学者米兰柯维奇(1920)提出并从理论上阐明的第四纪冰期形成的天文假说以及与第四纪深海和黄土沉积物建立的温度系列一致的结果(Hays *et al.*, 1976; Liu *et al.*, 1999),为地层学选定合理可行的时间坐标单位谱及建立高分辨率地质时间坐标奠定了良好的基础,提供了可供借鉴的范例,并使得旋回地层学应运而生。

3 旋回地层学

旋回地层学(cyclostratigraphy)一词首次由 A. G. Fischer 于 1988 年在意大利 Perugia 召开的专业学术会议上提出(Doyle and Bennett, 1998),是较年轻和发展迅速的地层学分支学科。由于旋回地层学在进行高分辨率地层划分对比和建立高分辨率地质年代表方面的巨大潜力,它越来越受到地层学和地学工作者的广泛关注(Schwarzacher, 1993a, 2000; De Boer and Smith, 1994; Bai, 1995; House, 1995a; Miall, 1997; Doyle and Bennett, 1998; 龚一鸣和李保华, 1999; 童金南和殷鸿福, 1999; Hinnov, 2000; Gong *et al.*, 2001, 2004; Rio *et al.*, 2003; 龚一鸣等, 2004; Gradstein *et*

al., 2004)。

3.1 旋回地层学的基本概念

旋回(cycle)、韵律(rhythm)和节律(rhythm/periodicity)是地层学和沉积学中表示具有重现性或周期性沉积记录的术语,包含描述性和解释性的双重含义,在一般意义和一定范围内,它们具有相似或相同的内涵。从严格意义上说,旋回层比韵律层的重现时间间隔更长,空间分布范围更大,构成单元更多,表现形式更复杂多变;节律则是旋回和韵律的统称,使用范围更广。

“旋回”或“旋回套旋回”是地层记录的重要特征。地层记录的旋回性是沉积作用、沉积环境或驱动机制旋回的产物。根据驱动机制的不同,地层旋回通常区分为自旋回(autocyclicity)和它旋回(alloccyclicity)两类。自旋回主要由环境旋回所致,具有局域性和区域性,如河道、三角洲朵体的侧向迁移形成的地层旋回。它旋回通常由环境旋回因素以外的驱动机制所致,具有大区域、跨区域,甚至全球可比性,如风暴—浊流沉积旋回、海平面变化旋回和米兰柯维奇旋回等,它们分别是事件沉积学、层序地层学和旋回地层学的主要研究对象。

纹层/层、层束、层束组和超层束组是旋回地层学中经常使用的描述性术语(图 3)。纹层(lamina)是地层中肉眼可见的最小单元,内部成分、结构、构造相对均一,其厚度为毫米级。厚度厘米级或厘米级以上者可称为层(bed/layer/stratification)。层束(bundle)由 2 种或 2 种以上不同的纹层或层构成的基本旋回单元,通常成对出现。层束组(bundle set)由多个层束组合而成,在空间上具有较稳定的延伸和较大范围的分布,层束组界面通常为显示度较高的自然层面。超层束组(superbundle set)由多个层束组合而成,在空间上具有更稳定的延伸和更大范围的分布。在露头上纹层/层的组合特征、方式及其级序结构是旋回地层学研究的主要内容之一。

旋回地层学是指研究受天文轨道周期力控制形成的地层序列的地层学分支学科,其中由周期在 10 ka~2 Ma 之间的轨道力旋回,即米兰柯维奇旋回形成的旋回地层序列是旋回地层学研究的重点(Schwarzacher, 1993a; House, 1995a; Doyle and Bennett, 1998)。因此,轨道旋回地层学(orbital cyclostratigraphy)是旋回地层学更具体的表述(Buonocunto *et al.*, 1999; Gong *et al.*, 2001; Gong and Li, 2004)。尽管旋回地层学术语的产生至今不过十

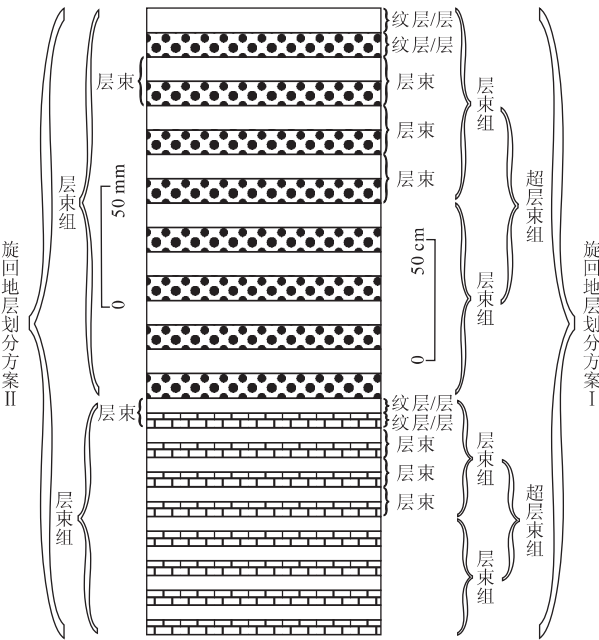


图 3 旋回地层的级序结构、描述术语及划分方法示意图
Fig. 3 Sketch showing the hierarchical structures, description terms and subdivision methods of cyclotheims in cyclostratigraphy

余年的历史,但轨道旋回能影响行星地球气候和沉积记录以及在建立高分辨率地质时间坐标方面巨大潜力的思想早在 19 世纪后期就已萌芽(Gilbert, 1895). 20 世纪初,前南斯拉夫学者米兰柯维奇(1920)提出了第四纪冰期形成的天文假说,他认为:北半球夏半年日照量的减少,是冰期形成的原因;任意纬度日照量 W 的大小,是太阳常数 S_0 、偏心率 e 、黄赤交角 ϵ 和岁差 p 的函数,即: $W=f(S_0, e, \epsilon, p)$,其中 S_0 变化很小,可视为常数. 米兰柯维奇根据上述地球的 3 个轨道要素,计算了北纬 65 度线上 100 万年来日照量的变化,100 万年来日照量的 9 个极小值与第四纪冰期非常吻合,并与第四纪深海和黄土沉积物建立的温度系列一致(Hays *et al.*, 1976; Liu *et al.*, 1999). 因此,第四纪中的米兰柯维奇旋回沉积已被地学家所证实,可能的米兰柯维奇旋回已追溯到前第四纪(House, 1985; Herbert and D'Hondt, 1990; Schwarzacher, 1993b; Doyle and Bennett, 1998; Zachos *et al.*, 2001; Gallet *et al.*, 2003)、前中生代(Elrick, 1995; House, 1995b; Elrick and Hinnov, 1996; 江大勇等,1999;郝维城等, 2000;Gong *et al.*, 2001,2004;龚一鸣等,2004),甚至前寒武纪(Grotzinger, 1986). 由于米兰柯维奇旋

回是天文力,它在空间分布和等时性上必然具有全球性,在整个地史时期均应有记录. 地层学家的任务就是寻求有效的方法和手段过滤掉各种噪音,使记录在地层中的米兰柯维奇旋回规律清楚地显露出来.

米兰柯维奇旋回(Milankovitch cycle)是指月球、木星等天体对地球绕太阳自转和公转运动的影响,使地球的 3 个轨道要素:偏心率、黄赤交角(或地轴倾斜度)和岁差发生周期性变化的现象(图 4). 偏心率(eccentricity)是地球绕太阳公转椭圆轨道的赤道半径与极半径之差与赤道半径之比,其值在 0.000 5~0.060 7 之间,第四纪的变化周期为 10 万年(图 4). 天体力学的研究表明,偏心率的变化主要由极半径变化所致,赤道半径通常变化不大(任振球,1990). 冰期均发育于偏心率的最小值,这相当于日地距离增加,地球获得的日照量减少. 斜度(obliquity)或黄赤(ecliptic and equator)交角是地球绕太阳公转的轨道平面(黄道面)与赤道面的夹角(ϵ),变化于 $22^{\circ}02' \sim 24^{\circ}30'$,变化周期在第四纪约为 4 万年,现在的 $\epsilon=23^{\circ}27'$ (图 4). 黄赤交角影响不同纬度和季节气候的差异程度,黄赤交角变化对极区影响大,对赤道影响小. 岁差(precession)是指地球自转轴的进动(地球自转轴绕黄道轴旋转的运动),春分点沿黄道向西缓行,使回归年(太阳视圆面中心两次过春分点所经历的时间)短于恒星年(地球绕太阳公转一周所经历的时间)的现象,岁差值为 $20'23''$,岁差周期在第四纪约 2 万年(图 4). 岁差变化对赤道

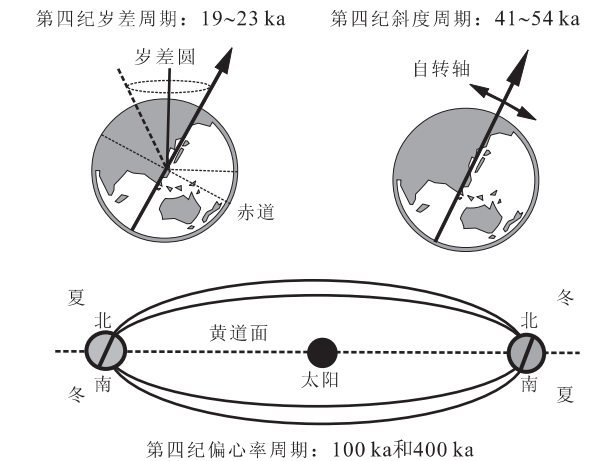


图 4 地一月一系统 和米兰柯维奇旋回示意图(据 House, 1995a,1995b 改编)
Fig. 4 The sketch showing the earth-moon-sun system and Milankovitch cycle

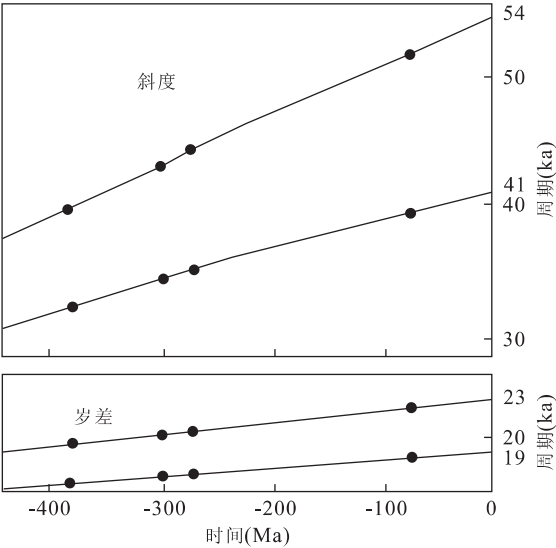


图 5 岁差和斜度周期随时间的变化(据 Doyle and Bennett, 1998)

Fig. 5 Variations of precession and obliquity periods through time

地区影响大,对极区影响小。

由于地史时期月—地距离的缩小(590 Ma 以来,缩小速率为 3.16 cm/a;前寒武纪为 1.36 cm/a)(Berger and Loutre, 1994)和地球自转速度的变慢,这些变化在岁差和斜度的变化周期和幅度上也有不同程度的体现。天文地质计算(Berger and Loutre, 1994)表明:2 500 Ma 以来岁差和斜度的周期值是增大的(图 5),中元古代与第四纪的差值分别达 40%~45%和 59%~66%(表 1);2 500 Ma 以来斜度值的变化幅度减小了约 60%,岁差值的变化幅度则很小。由于偏心率不受月—地距离的影响,在地史时期变化较小,200 Ma 以来约 1.5%。

3.2 旋回地层学与层序地层学的关系

人们普遍认为层序地层学是在 20 世纪 70 年代高分辨率地震地层学(Vail *et al.*, 1977)基础上发展起来的沉积地质学分支学科,尽管地层的形成与海平面变化和构造作用之间关系的思想可追溯到 20 世纪初,甚至 19 世纪早中期(朱筱敏,2000)。旋回地层学与层序地层学均涉及地层记录旋回性及其旋回驱动机制的研究,但他们在如下方面存在根本差别:

(1)在科学目标上,旋回地层学借助具有级序结构和谱系关联的轨道周期,对受轨道力驱动的地层记录进行精细定年,通过跨区域和跨板块旋回层的划分对比,试图建立高分辨率的数字年代地层格架,进一步精细和优化建立在生物地层学基础上的地质

表 1 地史时期的岁差和斜度周期(据 Berger and Loutre, 1994 编制)

Table 1 Periods of precession and obliquity through time				
年龄值(Ma)	岁差周期(a)		斜度周期(a)	
0(Q)	19 000	23 000	41 000	54 000
72	18 622	22 449	39 280	51 055
270	17 545	20 902	34 778	43 703
298	17 387	20 678	34 163	42 736
380(D ₂)	16 916	20 015	32 390	39 997
440	16 567	19 529	31 134	38 099
500	16 207	19 029	29 885	36 245
1 000	14 832	17 162	25 522	30 021
1 500	13 765	15 750	22 520	25 951
2 000	12 612	14 258	19 590	22 136
2 500(Pt ₁)	11 345	12 659	16 693	18 507
0/2 500 差值	7 655	10 341	24 307	35 493
0/2 500 增值百分比	40%	45%	59%	66%
0/380 差值	2 084	2 985	8 610	14 003
0/380 增值百分比	11%	13%	21%	26%

年代表,并使之与人类社会所运用的时间坐标接轨。层序地层学则是通过对副层序、副层序组、体系域和层序及其类型的研究,查明沉积地层的组成和时空结构,为沉积矿产资源,特别是油气资源的寻找和勘探提供技术支撑。从这个意义上看,如其说层序地层学是一门地层学分支学科,不如说它是一种油气/能源矿产勘探技术。从层序地层学的起源和发展以及在油气勘探中的广泛运用也可说明这一点(Wilgus *et al.*, 1988; 朱筱敏,2000)。

(2)在研究内容上,旋回地层学侧重研究受轨道力驱动形成的沉积旋回记录,如短偏心率、斜度、岁差旋回等米兰柯维奇旋回和亚米兰柯维奇旋回,旋回周期通常为十万年级、万年级和千年级,而将轨道力以外的驱动机制(如构造,火山等)视为旋回地层学研究的噪音;主要受跨区域气候因素控制,连续、快速沉积的海、陆相地层通常是旋回地层学的理想研究对象。层序地层学主要研究由构造沉降、海/湖平面升降、沉积物供给速率和气候变化形成的层序界面和沉积层序及其构筑单元的组成、级序结构、叠置方式和空间分布样式以及层序级别。被动大陆边缘和陆架坡折带既是层序地层学概念、方法的发祥地,也是层序地层学的最佳研究地区。沉积层序通常分为 5 级:巨层序、超层序、层序、体系域/副层序组和副层序,他们所对应的持续时间周期从 >100 Ma 至 0.01 Ma 不等(Vail *et al.*, 1977; Miall, 1992; 王鸿祯等,2000)。在旋回周期上,受轨道力驱动形成

的沉积旋回大体相当4级和5级层序旋回或副层序组/副层序旋回。因此,层序地层学研究的层序和旋回与旋回地层学相比涉及的级别更多、成因更复杂多样。

(3)在研究方法上,旋回地层学强调气候变化替代指标,如 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{87}\text{Sr}$ 、 CaCO_3 和 Al_2O_3 的含量变化等规律的分辨、提取和解释。因为轨道力在沉积记录中的烙印是通过对气候变化的影响而实现的,因此,气候变化的替代指标可作为米兰科维奇旋回的替代指标。谱分析和小波分析等(Weedon, 2003)是旋回地层研究中分辨、提取和解释气候变化替代指标旋回周期、级序结构及其驱动机制的常用定量研究方法。层序地层学强调层序界面特征、类型的识别与追踪及其不同级别层序构筑单元的时空配置,地震地层、测井地层、岩心和露头沉积相分析是层序地层学常用的研究方法。

3.3 旋回地层学的研究方法

旋回地层学研究通常选择在地层连续,出露良好,宏观旋回及其级序结构清楚,且具有良好的生物地层和年代地层基础的地区和剖面上进行。由于米兰柯维奇旋回是一种全球范围的高频变化力,它对地层记录的影响是通过气候(温度、雨量等)和海平面变化对剥蚀、风化、搬运、沉积和生物的影响来实现的。因此,在构造稳定期和稳定区,当其他噪音较小时,地层记录中的米兰柯维奇旋回是可以识别和进行大区域、跨区域和全球对比的。识别米兰柯维奇旋回的关键是:(1)地层记录中旋回替代指标(proxy)的选择;(2)替代指标周期/频率及其级序结构的确定以及它们与米兰柯维奇旋回周期/频率及其级序结构的一致性;(3)替代指标周期或频率在时间上的持续性和在空间上的稳定性。

3.3.1 米兰柯维奇旋回替代指标的选择 从理论上说,与气候变化相关联的特征均可作为米兰柯维奇旋回的替代指标,如: $\delta^{18}\text{O}$ (反映气温或盐度的高低)、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (反映产力及有机物碳埋藏量的大小)、 $\delta^{87}\text{Sr}$ (反映陆源—海源物供给量的变化)值的高低; CaCO_3 和 Al_2O_3 (反映气候的冷暖干湿)的含量变化;黄土(干—冷)—古土壤(湿—热)旋回变化;岩性(灰岩—泥灰岩、硅质岩—灰岩、硅质岩—泥岩)交替(反映气候—环境的综合变化);地层的磁化率(反映风化作用的类型和强度)、电性(反映岩性)变化等。显然在这些与气候变化相关联的特征中,有些指标直接与气候变化有关,如 $\delta^{18}\text{O}$;有些则间接与气候

变化有关,如 $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ 。在前第四纪地层中,对海相地层而言,在盐度不变的前提下(Gong and Xu, 2003),虽然全岩或生物体中 $\delta^{18}\text{O}$ 能直接反映沉积介质表层温度的变化,但在成岩作用中,原始的氧同位素信息较原始的碳同位素信息易于受到干扰和破坏。因此,反映米兰柯维奇旋回替代指标的选择必须具体情况具体分析,区域地质和环境背景也是不容忽视的因素。

3.3.2 替代指标变化周期或频率的确定 从理论上说,只有替代指标的旋回周期或频率与米兰柯维奇旋回的周期和频率完全一致,我们方可认为替代指标旋回所代表的地层旋回为受轨道力控制的米兰柯维奇旋回。即使如此,这也仅是识别米兰柯维奇旋回的必要条件而不是充要条件。替代指标变化的时间序列谱分析是获取替代指标变化周期或频率的有效方法(Weedon, 2003)。替代指标变化周期或频率的确定是米兰柯维奇旋回识别中最困难的一步,对前第四纪或前中生代地层而言更是如此。众所周知,随着地质时代变老,地层的放射性同位素定年误差越大,分辨率越低;随着地质时代变老,生物的成种速率变慢,生物地层划分对比更为粗略。因此,从数量级上查明替代指标变化周期或频率与米兰柯维奇旋回周期或频率的一致性就成为替代指标变化周期或频率确定最好的近似方法之一。由于在不同地史时期长偏心率周期与偏心率周期、偏心率周期与斜度周期、偏心率周期与岁差周期之间具有相对固定的比率关系,因此,不同级序结构替代指标间的比率关系与长偏心率周期与偏心率周期、偏心率周期与斜度周期、偏心率周期与岁差周期之间比率关系一致性及其在时间上的持续性和在空间上稳定性的确定也是替代指标变化周期或频率确定及其米兰柯维奇旋回证明的重要判据。

3.3.3 替代指标周期或频率在时间上的持续性和在空间上的稳定性 如前所述,米兰柯维奇旋回是一种全球范围的高频变化力,自行星地球形成以来就一直存在,并影响着气候、沉积和生物。因此,与米兰柯维奇旋回周期或频率一致的替代指标频率或周期在时间上的持续性和在空间上的稳定性或可对比性是识别米兰柯维奇旋回不可缺少的判据。该判据的获取可通过地层的精细划分对比实现,其表现形式是与米兰柯维奇旋回周期或频率一致的替代指标在地层剖面(时间序列)上等时距分布,在地层剖面间可进行跨相、跨盆地和跨板块等时对比。

3.4 华南上泥盆统旋回地层学研究例析

泥盆纪的生物地层和年代地层研究走在显生宙各纪的前列,1992 年,泥盆系所有阶的全球界线层型剖面 and 点(GSSP)已建立。目前,泥盆系内已建立的 7 个阶和 57 个标准牙形石分带已成为国际地学界泥盆纪地质时间的通用标准。华南泥盆系是我国乃至世界上少有的发育良好、出露清楚以及地层学、沉积学和相关研究积累雄厚的研究地区和层段。

3.4.1 替代指标的选择——岩性旋回及其级序结构在对华南泥盆系牙形石生物地层(Wang, 1994)、层序地层和海平面变化系统研究(龚一鸣等, 1994, 1996a, 1996b, 2004; Gong *et al.*, 1997, 2004; 吴诒等, 1997; 龚一鸣和李保华, 2001)的基础上,在桂西南和桂东北地区分别选取了碳酸盐台地—斜坡—盆地相区中 4 条剖面作为旋回地层学研究的主干剖面。通过大比例尺剖面实测和地球化学分析(龚一鸣等, 2002, 2004)发现,岩性旋回及其级序结构是反映米兰柯维奇旋回的最佳替代指标之一。岩性旋回可分辨出纹层/层、层束、层束组、超层束组 4 级旋回地层结构,其中层束组在剖面上最清楚、直观和稳定(图 6, 图 7)。

纹层:主要通过岩性、颜色、有机质和化石含量的差异显示出来,构成纹层的岩性主要有钙质页岩、扁豆状灰岩、泥灰岩、微晶—细晶灰岩。纹层或层的厚度从 1 毫米至数毫米或厘米不等,呈薄板状、厚板状、带状、藕节状或透镜状连续或断续延伸。在出露良好的露头上,在数十厘米和数十米范围内纹层可连续或断续追踪。藕节状、透镜状断续延伸的纹层通常由差异压实所致,少数由生物扰动造成。在垂向上,纹层内部见有 2 种结构:均一结构和渐变结构。均一结构:纹层内部在露头和镜下无差异;渐变结构:纹层向上或向下在岩性、颜色、化石含量和体态方面表现出一定的变化性,在镜下尚可从纹层中分辨出多个微层(microlaminae)。

层束:由 2 种不同岩性、颜色等的纹层或层在垂向上交互叠置构成的基本旋回单元。层束大都以一种纹层或层为主,另一种纹层或层为辅成对产出。含有藕节状、透镜状纹层或层的层束,通常不构成一个易于剥离的自然分层;由薄板状、厚板状纹层或层构成的层束通常构成一个易于剥离的自然分层。

层束组:其顶底界线通常为自然层面。在杨堤剖面上,在层束与层束组之间尚可分辨出小层束组。成岩和后生作用往往使层束、小层束组和层束组界线

增强和易于识别、追踪。一个层束组通常由 3 个或 6 个层束构成(图 6, 图 7)。

超层束组:由岩性、结构、厚度和体态等相同或相似的多个层束组构成的自然组合(图 6, 图 7)。超层束组间的界面通常为层束组和/或层束结构变化的转换面,较层束组间界面更清楚、直观、空间分布更稳定。一个超层束组通常由 4 个或 3 个层束组构成。

3.4.2 替代指标变化周期及其级序结构的确定与对比在对华南泥盆系牙形石生物地层(Wang, 1994)、层序地层和海平面变化(龚一鸣等, 1994, 1996a, 1996b; 龚一鸣和李保华, 2001)系统研究的基础上,在广西德保都安剖面盆地相灰岩中,从中泥盆统吉维特阶顶部的 *disparilis* 带至上泥盆统法门阶下部的下 *triangularis* 带,识别出 177 个层束、48 个层束组和 12 个超层束组,共厚 989.5 cm,它们的平均厚度分别为 5.6 cm、20.6 cm 和 82.5 cm;绝大多数层束组由 3 个或 6 个层束组成;在 F-F 界线之下,一个超层束组均包含 4 个层束组,在 F-F 界线之上,一个超层束组包含 3 个层束组(图 6, 图 7)。

在桂林杨堤剖面斜坡相灰岩中,从上泥盆统弗拉阶的上 *rhenana* 带至法门阶的上 *triangularis* 带,识别出 21 个层束组和 6.5 个超层束组,共厚 1568 cm,它们的平均厚度分别为 74.4 cm 和 241.2 cm;一个层束组包括 3 个或 6 个层束;在 F-F 界线之下,一个超层束组包含 4 个层束组,在 F-F 界线之上,一个超层束组包含 3 个层束组(图 7)。

旋回层的对比(图 7)可以清楚地看到,在所研究的 12 个牙形石带中,包含层束组最多的牙形石带是下 *rhenana* 带和 *linguiformis* 带,包含的层束组数量为 8 个;包含层束组最少的牙形石带是 *jami-ae* 带,包含的层束组数量为 2 个。在两剖面的同一牙形石带内,即上 *rhenana* 带、*linguiformis* 带、下 *triangularis* 带内具有相同的层束组和超层束组数量和级序结构,即一个层束组包括 3 个或 6 个层束,层束组与层束的级序结构是 1:3 或 1:6;在 F-F 界线之下,一个超层束组包含 4 个层束组,超层束组与层束组间的级序结构为 1:4,在 F-F 界线之上,一个超层束组包含 3 个层束组,超层束组与层束组间的级序结构为 1:3。超层束组与层束组间的级序结构在 F-F 事件前后存在明显的差别。

由于同一牙形石带在一定生物地理区内是等时的(Belka *et al.*, 1997),那么该牙形石带内具有相同数量和级序结构的层束组和超层束组在不同剖

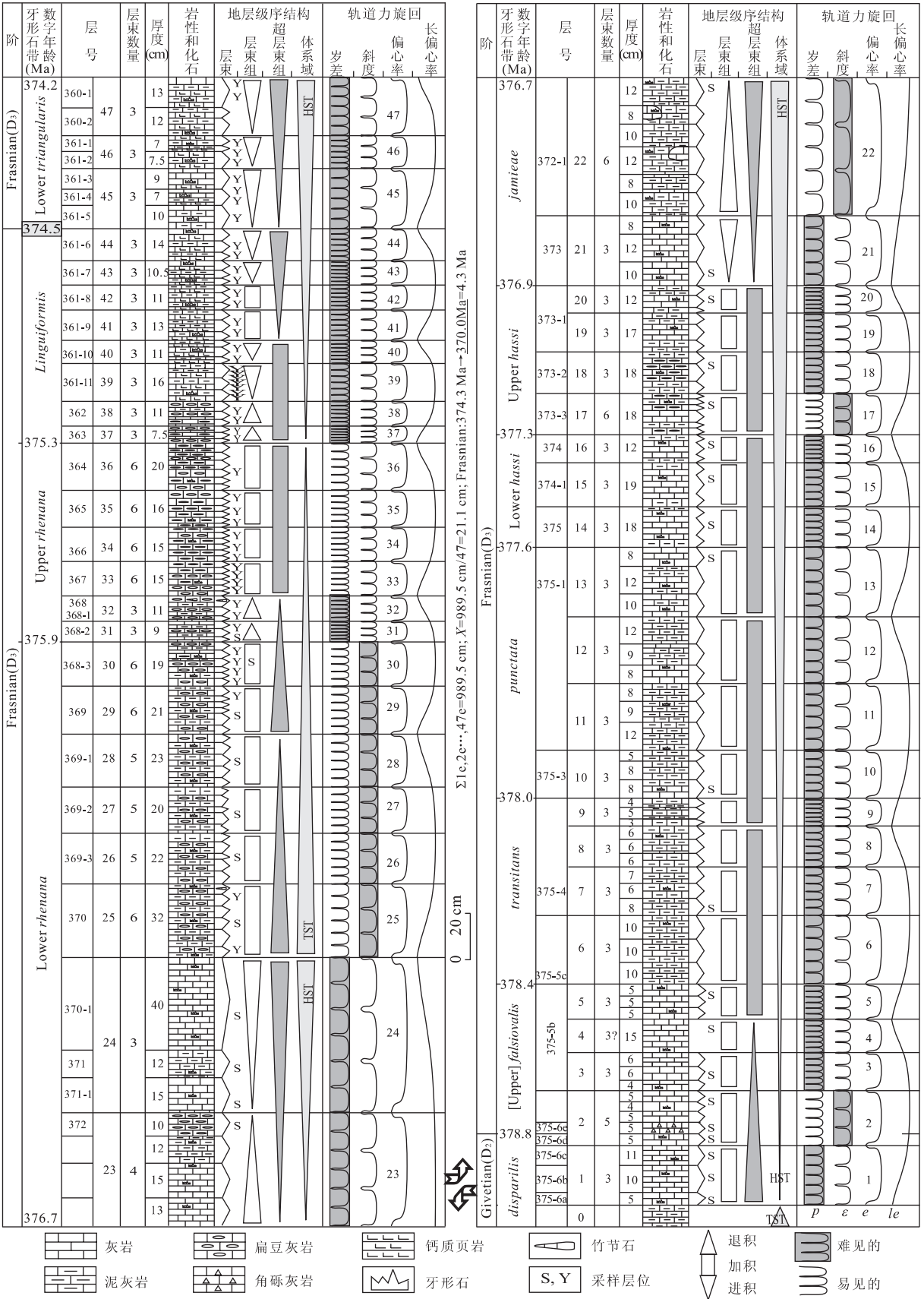


图 6 广西德保都安上泥盆统牙形石分带、旋回地层结构与数字定年(据龚一鸣等, 2004 修改)

Fig. 6 The Late Devonian cyclostratigraphic hierarchy of the Du'an section, South China

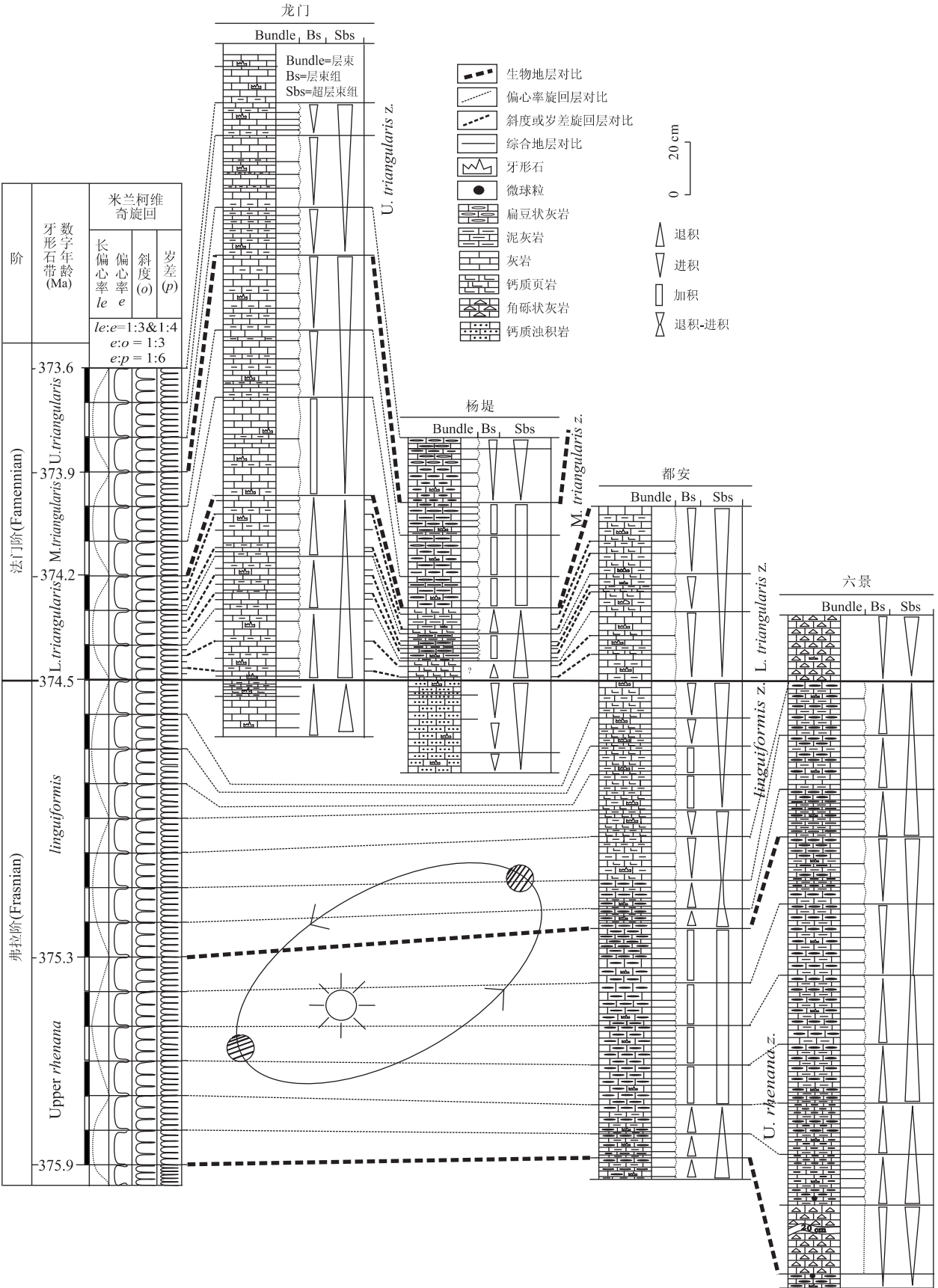


图 7 广西上泥盆统弗拉阶—法门阶之交旋回地层对比 (据 Gong et al., 2001 修改)
Fig. 7 The Late Devonian cyclostratigraphic correlation in Guangxi, South China

面上也应是基本等时的. 已公布的泥盆系年代地层系统及其数字定年资料(Harland *et al.* , 1990; Sandberg and Ziegler, 1996; Tucker *et al.* , 1998; Ziegler and Sandberg, 2000; Gradstein *et al.* , 2004)表明,上泥盆统 1 个标准牙形石带的平均时限为 0.47 Ma(Sandberg and Ziegler, 1996; Ziegler and Sandberg, 2000)或 0.64 Ma(Tucker *et al.* , 1998). 在研究剖面上,1 个标准牙形石带所包含的层束组个数变化于 2~8 个之间(图 6,图 7). 因此,1 个层束组的时间延续应为十万年. Belka *et al.* (1997)通过对摩洛哥中泥盆统爱菲尔阶牙形石定量生物地层和沉积相的研究表明,在碳酸盐台盆相间环境中(与华南泥盆纪古地理格局颇为类似),盆地相灰岩的沉积速率约为 2.5 m/Ma,即 25 cm/100 000a. 这一数值与德保都安剖面上 48 个层束组(盆地相灰岩)的平均厚度 21.1 cm 与其时间延续的估计值(100 000 a)之比(21.1 cm/100 000 a)非常接近.

特别值得指出的是, Berger *et al.* (1992)和 Berger and Loutre(1994)通过对地史时期轨道力的天文计算表明,泥盆纪偏心率周期与斜度周期、偏心率周期与岁差周期的比分别为 1 : 3.1 和 1 : 5.9; 长偏心率周期与偏心率周期之比为 1 : 4. 这种比例关系分别与研究剖面上层束组与层束和超层束组与层束组间 1 : 3 或 1 : 6 和弗拉阶上部上 *rhenana* 带和 *liguiformis* 带内的超层束组与层束组间 1 : 4 的级序结构一致. 广西六景剖面 and 桂林龙门剖面的旋回地层结构与上述二剖面也具有较好的可对比性(图 7).

因此,有理由认为,研究剖面中的层束组和层束以及超层束组旋回的驱动机制应为米兰柯维奇旋回

地层单位		牙形石带及时间延续(Ma)	数字年龄(Ma)				
			Harland <i>et al.</i> , 1990	Sandberg and Ziegler, 1996	Tucker <i>et al.</i> , 1998	Gradstein <i>et al.</i> , 2004	本文
上泥盆统	法 门 阶	<i>Rhomboidea</i>					
		<i>Crepida</i>					373.6
		上 <i>triangularis</i> 0.3					373.9
		中 <i>triangularis</i> 0.3					374.2
		下 <i>triangularis</i> 0.3					374.5
	弗 拉 阶	<i>linguiformis</i> 0.8	367.0	364.0	376.5	374.5	374.5
		上 <i>rhenana</i> 0.6					375.3
		下 <i>rhenana</i> 0.8					375.9
		<i>Jamieae</i> 0.2	10.4	5.0	6.0	10.8	376.7
		上 <i>hassi</i> 0.4					376.9
		上 <i>hassi</i> 0.3					377.3
		<i>punctata</i> 0.4					377.6
		<i>transitans</i> 0.4					378.0
		<i>falsiovlis</i> 0.4					378.4
							4.3
D ₂		<i>Disparilis</i>	377.4	369.0	382.5	385.3	378.8

图 8 上泥盆统牙形石带数字定年(据龚一鸣等,2004 修改)

Fig. 8 Numerical dating of the Late Devonian conodont zones

力,并分别相当于偏心率旋回、斜度或岁差旋回和长偏心率旋回,其周期值应分别为 100 000 a、33 333 a 或 16 667 a 和 400 000 a。层束组与层束、超层束组与层束组间的级序结构应是泥盆纪时偏心率周期与斜度周期、偏心率周期与岁差周期、长偏心率周期与偏心率周期比例关系的反映,即分别为:1:3、1:6和 1:4。研究剖面中的层束旋回很可能代表亚米兰柯维奇旋回。亚米兰柯维奇旋回力对新生代以来大气和海洋系统的显著影响已逐渐为地球科学家们所认识(Rial, 1999; Willis *et al.*, 1999; 汪品先和翦知缙, 1999),并在陆地上的玛珥湖(Willis *et al.*, 1999)和大洋沉积(汪品先和翦知缙, 1999)中有清楚的记录。

3.4.3 旋回地层学研究的意义 利用上述研究结果可对上泥盆统从 *falsiovalis* 带至上 *triangularis* 带的 12 个牙形石带进行数字定年(图 6、7、8)和对 F-F 之交牙形石的演化过程作出定量估价。图 8 显示,从 *falsiovalis* 带至上 *triangularis* 带 5.2 Ma 的时间跨度内,牙形石新物种出现最快的时期是 F-F 事件后的下、中、上 *triangularis* 带,一个新物种的出现只需 0.3 Ma;新物种出现最慢的时期是 F-F 事件前的 *linguiformis* 带至下 *rhenana* 带,一个新物种的出现需要 0.6~0.8 Ma;而远离 F-F 事件的弗拉阶下部,一个新物种出现所需时间则介于上述二者之间。根据牙形石新物种出现的快慢, F-F 之交生物的演化过程可划分为背景期、集群绝灭期和复苏期,分别以新物种的出现速率 2~3 个/Ma、1~2 个/Ma 和 3~4 个/Ma 为特征。

图 8 还表明,在不同地史时期和阶段,生物演化速度表现出明显的非均一性。用已公布的阶间界线数字年龄值之差除以阶内化石带的个数所得的化石带的平均时间延续并不能真实地反映生物和环境演变过程的这种复杂性和非均一性。因此,旋回地层学研究意义可概括为 3 个方面:其一,在已有生物地层和年代地层研究基础上,可大大提高年代地层划分对比精度,对建立高分辨率地质时间坐标具有重要意义;其二,可对已建立的标准化石带进行数字定年,量化生物演化、生物集群绝灭和复苏的过程,精细揭示生物与环境的耦合关系;其三,阐明轨道力的特征和演化,为天文学的研究提供重要资料。

致谢:文章初稿完成后,历时近 3 年,承蒙多位匿名同行审阅和资深专家把关,提出了许多建设性的意见和建议,也有专家认为文章的有些认识和提

法似乎有些另类 and 尖锐。尽管我们作了一些修改,但文章的总体风格并未根本改变。我们认为,对同一问题和现象,不同的学者从不同的角度发表不同的看法和认识是正常现象,这些不同的观点可以是以求同为主,也可以是以求异为主,还可以是以“标新”为主。我们认为,基于尊重前人和事实的求异和“标新”能引起关注和争鸣,有利于推进学科和科学的发展。在当前形势下,营造这种学术氛围尤为重要。科学先哲曾告诫我们“如其重复一句不会错的话,不如试着讲一句可能会错的话”。正是基于这些考虑,我们在文章中使用了一些非常规的思考和表达,这可能有 利于人们对地质学、地层学时间概念的深层次思考,进一步推进地层学的快速发展。如果我们只是习惯于对现有的科学知识、概念唱赞歌,不敢越雷池一步将不利于科学的繁荣和知识的创新。谨此对多位匿名同行和资深专家以及《地球科学》编辑部付出的辛勤劳动和严格把关表示衷心的感谢!

References

- Bai, S. L., 1995. Milankovitch cyclicity and time scale of the Middle and Upper Devonian. *International Geological Review*, 37: 1109—1114.
- Belka, Z., Kaufmann, B., Bultynck, P., 1997. Conodont-based quantitative biostratigraphy for the Eifelian of the eastern Anti-Atlas, Morocco. *Geological Society of America Bulletin*, 109(6): 643—651.
- Berger, A., Loutre, M. F., 1994. Astronomical forcing through geological time. In: De Boer, P. L., Smith, D. G., eds., *Orbital forcing and cyclic sequences*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 19: 15—24.
- Berger, A., Loutre, M. F., Laskar, J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 255(5044): 560—566.
- Brassell, S. C., Eglinton, G., Marlowe, I. T., et al., 1986. Molecular stratigraphy: A new tool for climatic assessment. *Nature*, 320: 129—133.
- Buonocunto, F. P., D'Argenio, B., Ferreri, V., et al., 1999. Orbital cyclostratigraphy and sequence stratigraphy of Upper Cretaceous platform carbonates at Monte Sant' Eraso, southern Apennines, Italy. *Cretaceous Research*, 20(1): 81—95.
- De Boer, P. L., Smith, D. G., 1994. Orbital forcing and cyclic sequences. In: De Boer, P. L., Smith, D. G., eds., *Orbital forcing and cyclic sequences*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 19: 1—14.

- Doyle, P. , Bennett, M. R. , 1998. Unlocking the stratigraphical record; Advances in modern stratigraphy. John Wiley & Sons Ltd. , Chichester, 1—532.
- Du, Y. S. , Sheng, J. H. , Ding, Z. J. , 1997. Non Smith strata in the orogen and their geological mapping. *Regional Geology of China*, 16(4): 439—443 (in Chinese with English abstract).
- Dunbar, C. O. , Rodgers, J. , 1957. Principle of stratigraphy. John Wiley and Sons, New York, 1—356.
- Elrick, M. , 1995. Cyclostratigraphy of Middle Devonian carbonates of the eastern Great Basin. *Journal of Sedimentary Research*, 65(1B): 61—79.
- Elrick, M. , Hinnov, L. A. , 1996. Millennial-scale climate origins for stratification in Cambrian and Devonian deep-water rhythmites, western USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 123(1—4): 353—372.
- Feng, Q. L. , 1993. Principles and methods for the regional stratigraphic studies of orogenic belts. *Geological Science and Technology Information*, 12(3): 51—56 (in Chinese with English abstract).
- Gallet, Y. , Krystyn, L. , Besse, J. , et al. , 2003. Improving the Upper Triassic numerical time scale from cross-correlation between Tethyan marine sections and the continental Newark basin sequence. *Earth and Planetary Science Letters*, 212: 255—261.
- Gilbert, G. K. , 1895. Sedimentary measurement of geological time. *Journal of Geology*, 3: 121—125.
- Gong, Y. M. , Du, Y. S. , Feng, Q. L. , et al. , 1996a. Sedimentary geology of the orogenic belts of China and coupling among the earth-spheres. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1—146 (in Chinese with English summary in detail).
- Gong, Y. M. , Du, Y. S. , Feng, Q. L. , et al. , 1996b. Thinking about non-Smith stratigraphy. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 21(1): 19—26 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y. M. , Li, B. H. , 1999. High resolution stratigraphy, Milankovitch cycle and ENSO event deposits. *Geological Science and Technology Information*, 18(2): 32—36 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y. M. , Li, B. H. , 2001. Devonian Frasnian-Famennian transitional event deposits and sea-level changes. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 26(3): 251—257 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y. M. , Li, B. H. , 2004. Reply to comment on “Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famennian transition in South China”. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 205(1—2): 171—175.
- Gong, Y. M. , Li, B. H. , Si, Y. L. , et al. , 2002. Late Devonian red tide and mass extinction. *Chinese Science Bulletin*, 47(13): 1138—1144.
- Gong, Y. M. , Li, B. H. , Wang, C. Y. , et al. , 2001. Orbital cyclostratigraphy of the Devonian Frasnian-Famennian transition in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168(3—4): 237—248.
- Gong, Y. M. , Wu, Y. , Du, Y. S. , 1994. Devonian sequence stratigraphy and frequencies, amplitudes, velocities and phases of sea-level changes in Guizhou and Guangxi provinces. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(5): 575—586 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y. M. , Xu, R. , Tang, Z. D. , et al. , 2005. The Upper Devonian orbital cyclostratigraphy and numerical dating conodont zones from Guangxi, South China. *Science in China (Series D)*, 48(1): 32—41.
- Gong, Y. M. , Wu, Y. , Du, Y. S. , et al. , 1997. Devonian sea-level change rhythms in South China and coupling relationships among the earth-spheres. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 71(4): 370—385.
- Gong, Y. M. , Xu, R. , 2003. Conodont apatite $\delta^{18}\text{O}$ signatures indicate climatic cooling as a trigger of the Late Devonian mass extinction: Comment and reply. *Geology*, 31(4): 383.
- Gong, Y. M. , Yin, H. F. , Zhang, K. X. , et al. , 2004. Simplifying the stratigraphy of time; Comment. *Geology*, 32(8): e59.
- Grabau, A. W. , 1913. Principle of stratigraphy. Seiler, A. G. , and Co. , New York, 1—1185.
- Gradstein, F. M. , Ogg, J. G. , Smith, A. G. , et al. , 2004. A new geologic time scale, with special reference to Precambrian and Neogene. *Episodes*, 27(2): 83—100.
- Grotzinger, J. P. , 1986. Upward shallowing platform cycles: A response to 2.2 billion years of low-amplitudes, high-frequency (Milankovitch band) sea level oscillations. *Paleoceanography*, 1: 403—416.
- Hao, W. C. , Bai, S. L. , Jiang, D. Y. , 2000. Uniformity of the upper Famennian Milankovitch cycle in China. *Chinese Science Bulletin*, 45(24): 2286—2291.
- Haq, B. U. , Hardenbol, J. , Vail, P. R. , 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235: 1156—1167.
- Harland, W. B. , Smith, D. G. , Armstrong, R. L. , et al. , 1990. A geologic time scale 1989. Cambridge University Press, Cambridge, 1—265.
- Hays, J. D. , Imbrie, J. , Shackleton, N. J. , 1976. Variations in the Earth's orbit: Pacemaker of the Ice Ages. *Science*, 194(4270): 1121—1132.

- Hedberg, H. D., 1976. International stratigraphic guide—A guide to stratigraphic classification, terminology and procedure. John Wiley and Sons, New York, 1—200.
- Herbert, T. D., D' Hondt, S. L., 1990. Precessional climate cyclicity in Late Cretaceous-Early Tertiary marine sediments: A high resolution chronometer of Cretaceous-Tertiary boundary events. *Earth and Planetary Science Letters*, 99(3): 263—275.
- Hinnov, L. A., 2000. New perspectives on orbitally forced stratigraphy. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 419—475.
- Holland, C. H., 1986. Some aspects of time. *Newsletters on Stratigraphy*, 15(3): 172—176.
- House, M. R., 1985. A new approach to an absolute timescale from measurements of orbital cycles and sedimentary microrhythms. *Nature*, 315: 721—725.
- House, M. R., 1995a. Orbital forcing timescales: An introduction. In: House, M. R., Gale, A. S., eds. Orbital forcing timescales and cyclostratigraphy. *Geological Society of London, Special Publication*, (85): 1—18.
- House, M. R., 1995b. Devonian precessional and other signatures for establishing a Givetian timescale. In: House, M. R., Gale, A. S., eds., Orbital forcing timescales and cyclostratigraphy. *Geological Society of London, Special Publication*, (85): 37—49.
- Prigogine, I., 1986. From being to becoming time and complexity in the physical science. Translated by Zeng, Q. H., Yan, S. J., Ma, B. F., et al., Shanghai Science and Technology Press, Shanghai, 1—256.
- Jiang, D. Y., Hao, W. C., Bai, S. L., 1999. Relationships between eccentricity and chemo-stratigraphical cycles from the Devonian upper Givetian of Guangxi. *Chinese Science Bulletin*, 44(9): 989—992 (in Chinese).
- Jin, X. C., 1984. Essential of plate tectonics. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai, 1—283 (in Chinese).
- Liu, D. S., Ding, Z. L., Rutter, N., 1999. Comparison of Milankovitch periods between continental loess and deep sea records over the last 2.5 Ma. *Quaternary Science Reviews*, 18: 1205—1212.
- Miall, A. D., 1992. Exxon global cycle chart: An event for every occasion? *Geology*, 8: 787—790.
- Miall, A. D., 1997. The geology of stratigraphic sequences. Springer, Berlin, 200—223.
- Ren, Z. Q., 1990. Global changes: Anomalous changes of geospheres and their celestial origin. Science Press, Beijing, 1—226 (in Chinese).
- Rial, J. A., 1999. Pacemaking the ice ages by frequency modulation of earth's orbital eccentricity. *Science*, 285: 564—568.
- Rio, D., Silva, I. P., Capraro, L., 2003. The geologic time scale and the Italian stratigraphic record. *Episodes*, 26(3): 259—263.
- Salvador, A., 1994. International stratigraphic guide—A guide to stratigraphic classification, terminology and procedure. John Wiley and Sons, New York, 1—214.
- Sandberg, C. A., Ziegler, W., 1996. Devonian conodont biochronology in geologic time calibration. *Senckenbergiana Lethaea*, 76: 259—265.
- Schwarzacher, W., 1993a. Cyclostratigraphy and the Milankovitch theory. Elsevier, Amsterdam, 1—225.
- Schwarzacher, W., 1993b. Milankovitch cycles in the pre-Pleistocene stratigraphic record: A review. In: Hailwood, E. A., Kidd, R. B., eds., High resolution stratigraphy. Elsevier, Amsterdam, 187—194.
- Schwarzacher, W., 2000. Repetitions and cycles in stratigraphy. *Earth Science Reviews*, 50: 51—75.
- Tong, J. N., Yin, H. F., 1999. A study on the Griesbachian cyclostratigraphy of Meishan Section, Changxing, Zhejiang Province. *Journal of Stratigraphy*, 23(2): 130—135 (in Chinese with English abstract).
- Tucker, R. D., Bradley, D. C., Ver Straeten, C. A., et al., 1998. New U-Pb zircon ages and the duration and division of Devonian time. *Earth and Planetary Science Letters*, 158: 175—186.
- Vail, P. R., Mitchum, H. M., Todd, R. G., et al., 1977. Seismic stratigraphy and globe changes of sea level. *AAPG Mem.*, 36: 129—144.
- Wang, C. Y., 1994. Application of the Frasnian standard conodont zonation in South China. *Cour. Forschungsinst. Senckenberg*, 168: 83—129.
- Wang, H. Z., 1995. Retrospection of stratigraphical discipline. In: Wang, H. Z., ed., Retrospection of geological discipline in China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 59—63 (in Chinese).
- Wang, H. Z., Shi, X. Y., Wang, X. L., et al., 2000. Research on the sequence stratigraphy of China. Guangdong Science and Technology Press, Guangzhou, 1—457 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., Jian, Z. M., 1999. Searching high-resolution paleoenvironmental records: A review. *Quaternary Sciences*, (1): 1—17 (in Chinese with English abstract).
- Weedon, G., 2003. Time-series analysis and cyclostratigraphy. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 1—259.

- Wilgus, C. K., Hastings, B. S., Kendall, C. C., et al., 1988. Sea-level changes—An integrated approach. *SEPM Special Publication*, 42: 1–407.
- Willis, K. J., Kleczkowski, A., Briggs, K. M., et al., 1999. The role of sub-Milankovitch climatic forcing in the initiation of the Northern Hemisphere glaciation. *Science*, 285: 568–571.
- Wu, R. T., Wang, Z. P., 1994. Principles and methods of stratigraphy. Geological Publishing House, Beijing, 1–131 (in Chinese).
- Wu, Y., Gong, Y. M., Du, Y. S., 1997. Devonian sequence stratigraphy and sea level changes in South China. China University of Geosciences Press, Wuhan, 1–110 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Zhang, H. T., Qihe, R. G., et al., 1999. An opinion on the “non-Smith stratigraphy”. *Regional Geology of China*, 18(3): 225–228 (in Chinese with English abstract).
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., et al., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science*, 292: 686–693.
- Zeng, G. P., 2003. Time questioned by Ilya Prigogine. *Science Times*, 13th June.
- Zhang, K. X., Chen, N. S., Wang, Y. B., et al., 1997. A preliminary research on the sequence reconstruction of non-Smith stratigraphy in eastern Kunlun orogenic belt. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 22(4): 343–346 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. X., 1989. Theoretical stratigraphy. Science Press, Beijing, 1–165 (in Chinese).
- Zhu, X. M., 2000. Sequence stratigraphy. University of Petroleum Press, Dongying, 1–207 (in Chinese).
- Ziegler, W., Sandberg, C. A., 2000. Utility of Palatolepids and Icriodontids in recognizing Upper Devonian series, stage, and possible substage boundaries. *Cour. Forschungenst. Senckenberg*, 225: 335–347.
- 附中文参考文献**
- 杜远生, 盛吉虎, 丁振举, 1997. 造山带非史密斯地层及其地质制图. *中国区域地质*, 16(4): 439–443.
- 冯庆来, 1993. 造山带区域地层学研究的思想和工作方法. *地质科技情报*, 12(3): 51–56.
- 龚一鸣, 杜远生, 冯庆来, 等, 1996a. 造山带沉积地质与圈层耦合. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–146.
- 龚一鸣, 杜远生, 冯庆来, 等, 1996b. 关于非史密斯地层的几点思考. *地球科学——中国地质大学学报*, 21(1): 19–26.
- 龚一鸣, 李保华, 1999. 高分辨率地层学与 Milankovitch 旋回和 ENSO 事件沉积. *地质科技情报*, 18(2): 32–36.
- 龚一鸣, 李保华, 2001. 泥盆系弗拉阶/法门阶之交的事件沉积和海平面变化. *地球科学——中国地质大学学报*, 26(3): 251–257.
- 龚一鸣, 李保华, 司远兰, 等, 2002. 晚泥盆世赤潮与生物集群绝灭. *科学通报*, 47(7): 554–560.
- 龚一鸣, 吴治, 杜远生, 1994. 黔桂泥盆纪层序地层及海平面变化的频幅、速度和相位. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(5): 575–586.
- 龚一鸣, 徐冉, 汤中道, 等, 2004. 广西上泥盆统轨道旋回地层与牙形石带的数字定年. *中国科学(D辑)*, 34(7): 635–643.
- 郝维城, 白顺良, 江大勇, 2000. 法门阶上部米兰柯维奇旋回在中国发育的一致性. *科学通报*, 45(15): 1654–1660.
- Prigogine, I., 1986. 从存在到演化——自然科学中的时间及复杂性. 曾庆宏, 严士健, 等译. 上海: 上海科学技术出版社, 1–256.
- 江大勇, 郝维城, 白顺良, 1999. 广西泥盆系吉维特阶上部地层中的化学旋回与米兰科维奇偏心率旋回的关系. *科学通报*, 44(9): 989–992.
- 金性春, 1984. 板块构造学基础. 上海: 上海科学技术出版社, 1–283.
- 任振球, 1990. 全球变化——地球四大圈异常变化及其天文成因. 北京: 科学出版社, 1–226.
- 童金南, 殷鸿福, 1999. 浙江长兴煤山剖面 Griesbachian 期旋回地层研究. *地层学杂志*, 23(2): 130–135.
- 王鸿祯, 1995. 地层学学科发展的回顾. 见: 王鸿祯主编, 中国地质学科发展的回顾. 武汉: 中国地质大学出版社, 59–63.
- 王鸿祯, 史晓颖, 王训练, 等, 2000. 中国层序地层研究. 广州: 广东科技出版社, 1–457.
- 汪品先, 翦知缙, 1999. 寻求高分辨率的古环境记录. 第四纪研究, (1): 1–17.
- 吴瑞棠, 王治平, 1994. 地层学原理及方法. 北京: 地质出版社, 1–131.
- 吴治, 龚一鸣, 杜远生, 1997. 华南泥盆纪层序地层及海平面变化. 武汉: 中国地质大学出版社, 1–110.
- 殷鸿福, 张洪涛, 其和日格, 等, 1999. 关于“非史密斯地层学”的一点意见. *中国区域地质*, 18(3): 225–228.
- 曾国屏, 2003. 普利高津(戈金)对时间的追问. *科学时报*, 2003–06–13.
- 张克信, 陈能松, 王永标, 等, 1997. 东昆仑造山带非史密斯地层序列重建方法初探. *地球科学——中国地质大学学报*, 22(4): 343–346.
- 张守信, 1989. 理论地层学——现代地层学概念. 北京: 科学出版社, 1–165.
- 朱筱敏, 2000. 层序地层学. 东营: 石油大学出版社, 1–207.