

doi:10.3799/dqkx.2011.045

旋回地层学理论基础、研究进展和展望

吴怀春^{1,2}, 张世红¹, 冯庆来³, 方念乔², 杨天水¹, 李海燕¹

1. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 北京 100083

2. 中国地质大学海洋学院, 北京 100083

3. 中国地质大学生物地质与环境地质国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 在过去30余年中旋回地层学研究得到了极大发展, 对理解和解决地球科学领域众多科学问题做出了很大贡献。旋回地层学(Cyclostratigraphy)已被定义为“对地层记录的(准)周期性旋回变化进行识别、描述、对比和成因解释, 并将其应用于地质年代学以提高地层年代框架的精度和分辨率, 实现地层高精度划分与对比的一门地层学分支学科”。能够反映古气候变化的岩性、岩相、地球物理和地球化学参数(即古气候替代指标)均可用于旋回地层学分析。通过岩性组合识别、频谱分析、连续窗口频谱分析、小波分析、滤波和调谐等方法可进行识别米兰科维奇旋回信号和建立高精度天文年代标尺。中国学者在北方黄土剖面、南海新近纪海相沉积、古生代海相沉积和部分中新世陆相沉积中获得了良好的旋回地层学研究成果。对中国东北松辽盆地陆相白垩系和华南海相二叠系乐平统一—中三叠统开展旋回地层学研究有望取得重要突破。

关键词: 旋回地层学; 地沉学; 沉积学; 天文年代标尺; 松辽盆地; 华南。

中图分类号: P539

文章编号: 1000-2383(2011)03-0409-20

收稿日期: 2010-11-01

Theoretical Basis, Research Advancement and Prospects of Cyclostratigraphy

WU Huai-chun^{1,2}, ZHANG Shi-hong¹, FENG Qing-lai³, FANG Nian-qiao², YANG Tian-shui¹, LI Hai-yan¹

1. State Key Laboratory of Geobiology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

2. School of Ocean Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083, China

3. State Key Laboratory of Geobiology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The research on cyclostratigraphy has made great progress over the past 30 years, and it has contributed to the understanding and solutions of numerous scientific problems in the field of Earth Science. Now cyclostratigraphy has been defined as “the subdiscipline of stratigraphy that deals with the identification, characterization, correlation, and interpretation of cyclic variations in the stratigraphic record and, in particular, with their application in geochronology by improving the accuracy and resolution of time-stratigraphic frameworks”. The lithological, facies, geophysical and geochemical parameters (i. e., paleoclimate proxies), which can reflect paleoclimate fluctuations, have been adopted extensively in the cyclostratigraphy analysis. A set of methods, including characterization of lithological combination, power spectral analysis, evolutive power spectral analysis, wavelet analysis, filtering and tuning, have been developed to identify the Milankovitch cycles and establish high-resolution astronomical time scales. Some excellent cyclostratigraphy results have been obtained from loess deposits of northern China, Neogene marine deposits in South China Sea, Paleozoic marine sections, and some Meso-Neozoic terrestrial basins by Chinese scholars. We may get some important results if we can carry out cyclostratigraphy research on the Cretaceous terrestrial deposits in Songliao basin, northeastern China, and Lopingian-Middle Triassic marine sections in South China.

Key words: cyclostratigraphy; stratigraphy; sedimentology; astronomical time scale; Songliao basin; South China.

地球轨道参数的(准)周期性变化引起了地球表面日照量的(准)周期性变化, 进而导致全球气候的

(准)周期性变化, 并记录在对气候变化响应敏感的沉积系统中。地层中由地球轨道驱动力造成的旋回

基金项目: 国家自然科学基金项目(Nos. 40802012, 40839903); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(No. 2007CB411700); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2010ZD01)。

作者简介: 吴怀春(1977—), 男, 副教授, 主要从事旋回地层学、海洋地质学和古地磁学的教学和科研工作。E-mail: whcgeo@cugb.edu.cn

性记录称之为米兰科维奇旋回 (Milankovitch cycles). 由于地球轨道参数的岁差、斜率和偏心率变化具有相对稳定的周期,一旦从地层中识别出米兰科维奇旋回,就有可能建立分辨率达 0.02 Ma 的天文年代标尺 (Astronomical time scale, ATS) (Hinnov, 2004). 目前,米兰科维奇旋回正不断地从不同地质历史时期的海、陆相地层中揭示出来 (Hinnov and Ogg, 2007), 据此建立的高分辨率天文年代框架突破了传统的地质年代定年方法的瓶颈,甚至被称为“地层学解读时间的第三里程碑”(龚一鸣等, 2008). 最近几年旋回地层学研究取得的突破性进展已成为现代地层学一个新的学科增长点和亮点 (如 Hinnov and Ogg, 2007; Kuiper *et al.*, 2008).

本文将简要介绍旋回地层学的发展历史和基本概念,讨论地球轨道参数对全球气候变化的影响和可用于旋回地层学分析的古气候替代性指标,系统总结旋回地层学的研究方法、应用及意义. 本文还简要回顾了我国旋回地层学的研究进展和其前景提出研究展望,认为对中国东北松辽盆地白垩系和华南二叠系乐平统一中三叠统开展旋回地层学研究有可能取得重要突破.

1 旋回地层学理论基础及应用

1.1 旋回地层学发展历史及基本概念

1.1.1 发展历史 旋回地层学的发展与人们对第四纪冰期旋回驱动机制的探索紧密联系. 早在 1754 年,法国天文学家 Jean le Ronede d'Alembert 计算了地球岁差旋回对日照量的影响,指出当地球北半球 1 月份位于近日点时,南半球的夏季要缩短 168 个小时,北半球的夏季则要相应的延长. Adhémar (1842) 根据 Jean le Ronede d'Alembert 的计算结果,认为岁差旋回造成的南半球获得热量减少而北半球获得的热量增加是南半球发育大冰盖的原因,南、北半球冰川发育呈交替式出现. Croll (1864, 1875) 则提出在高偏心率时期,如果某半球夏天位于近日点,则寒冷的冬季利于冰盖发育. 因此,他也认为地球上的冰川发育以 ~10 ka 的时间间隔在南、北半球交替出现,但在低偏心率值期间冰川不发育,他还计算出末次大冰期在 8 万年前结束. 由于当时许多证据表明地球上曾发生多次冰期, Croll (1864, 1875) 的观点引起冰川学家的极大兴趣. 然而好景不长,当来自人类学和地质学的证据表明末次冰消期发生在 ~2 万年前的时候,人们对 Croll 学说的兴趣

逐渐消退.

当一些学者还在根据 Croll 的学说去解决冰川周期的问题时,另一些学者将目光投向了地层的旋回特征及成因解释. Gilbert (1895) 是第一个将旋回地层学原理应用到沉积旋回解释的地质学家. 他认为美国科罗拉多晚白垩世 Benton, Niobara 和 Pierre 群灰岩一页岩互层的旋回性变化是由岁差旋回引起,据此确定出地层沉积的持续时间与根据现代年代学得出的结果基本一致. Bradley (1929) 分析了美国怀俄明州的始新世绿河组的旋回,认为白云质泥灰岩旋回代表了岁差周期. De Geer (1940) 通过计算瑞典冰川前缘湖泊沉积物冬、夏季纹层的方法确定出瑞典末次冰期的消退持续了 13 600 a. 奥地利晚三叠世 Dachstein 组台地相灰岩具有级序旋回特征,表现为块状灰岩和层状白云质灰岩互层,5 个基本的旋回层还可组成层束组. Schwarzacher (1947) 认为不同级次的旋回组合分别由岁差和短偏心率控制.

Milankovitch (1941) 对地球轨道参数的定量计算是旋回地层学发展的分水岭. 他认为地球轨道变化决定了太阳光照量的大小,并认为 65°N 附近夏季太阳日照量变化是驱动第四纪冰期旋回的主因. 二战后深海活芯取芯技术、氧稳定同位素分析技术和数据分析技术的发展为旋回地层学的快速发展提供了机遇. Emiliani (1955, 1966) 利用深海连续岩心中的有孔虫化石氧同位素数据重建了古水温变化,并认为这种变化可能代表了 Milankovitch 理论的多期次冰期旋回. 其后, Shackleton 和 Opdyke (1973) 的研究表明深海氧同位素的变化能够直接反映全球冰量的变化. Hays *et al.* (1976) 对南印度洋两个钻孔合成的氧稳定同位素、夏季表层海水温度 (Ts) 和放射虫 *Cycladophora davisiana* 的相对丰度数据进行了频谱分析,结果显示 45 万年以来三者均受到了岁差、斜率和短偏心率的影响. 通过带通滤波方法获得了岁差和斜率信号并将其调谐到天文目标曲线上,建立了 45 万年以来高精度的天文年代学框架,进而探讨了气候变化与地球轨道参数之间的关系 (图 1). Hays *et al.* (1976) 的研究是旋回地层学发展的重要里程碑 (Crowley, 2002), 标志着现代旋回地层学的诞生 (Fischer *et al.*, 2004).

1.1.2 基本概念和术语 旋回地层学在过去 30 余年得到了迅猛发展,但长期以来国际地层委员会所出版的相关论著中并没有对旋回地层学这一年轻分支学科进行正式描述 (Strasser *et al.*, 2006). “旋回层” (cyclothem) 一词作为非正式岩性单位最早出

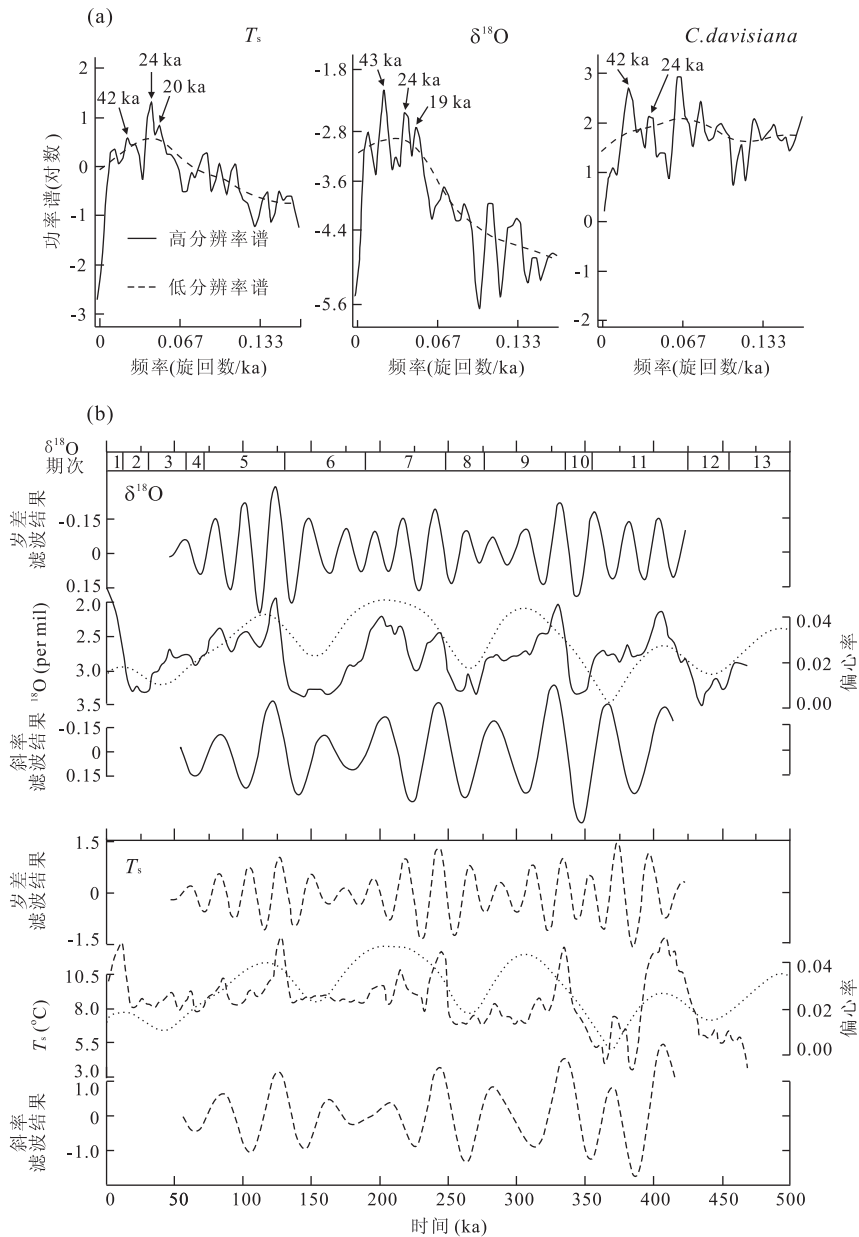


图 1 南印度洋 45 万年以来沉积记录的旋回地层学分析(修改自 Hays *et al.*, 1976)

Fig. 1 Cyclostratigraphy analysis on the combined record over the past 450 ka from two deep-sea cores in South Indian Ocean a. 夏季表层海水温度(T_s)、氧稳定同位素($\delta^{18}O$)和放射虫 *C. davisiana* 丰度的频谱分析; b. $\delta^{18}O$ 和 T_s 曲线及其岁差、斜率滤波曲线与天文理论偏心率曲线变化对比

现在 1976 年版的国际地层指南中 (Hedberg, 1976). 第二版的国际地层指南将古气候变化列为可用于校正年代地层界线的潜在工具, 但将碳酸钙含量和稳定同位素旋回归入化学地层学的范畴 (Salvador, 1994). 旋回地层学 (Cyclostratigraphy) 一词最早可能由 A. G. Fischer 在意大利 Perugia 和法国 Digne 举办的全球沉积地质大会上正式提出 (Fischer *et al.*, 1988). 他们指出旋回地层学的任务就是研究沉积地层中具有时间周期的沉积旋回和

其它旋回变化, 并将其应用于地质年代学以提高地层年代框架的精度.

国际地层划分小组委员会任命由荷兰乌得勒支大学 (University of Utrecht) Hilgen 教授领导的一个工作组制定旋回地层学的正式概念和相关术语, 并明确旋回地层学与其他地层学分支学科的关系. 在征求了国际地层划分小组委员会所有成员和各地层学分支学科主要专家的意见后, Hilgen *et al.* (2004) 正式发表了旋回地层学的相关基本概念和术

语,2006 年他们又对更多的术语进行了定义和说明 (Strasser *et al.*, 2006), 主要包括:

旋回地层学 (Cyclostratigraphy): 对地层记录的(准)周期性旋回变化进行识别、描述、对比和成因解释,并将其应用于地质年代学以提高年代地层框架的精度和分辨率,实现地层高精度划分与对比的一门地层学分支学科。

沉积旋回 (Sedimentary Cycle): 在旋回地层学中指的是与沉积系统(准)周期性变化有关的沉积记录和岩性变化的重复出现,具有时间意义。

天文旋回 (Astrocycle): 由于沉积旋回一词在沉积学和层序地层学中广泛使用,且成因不同,为避免歧义,可用天文旋回代替沉积旋回,特指由轨道力引起的沉积旋回或古气候替代性指标的旋回。

天文调谐 (Astronomical Tuning): 将沉积记录或古气候替代性指标的旋回记录对比到岁差、斜率、偏心率或(和)日照量变化曲线上。

天文年代表 (标尺) (Astronomical Time Scale, ATS): 将沉积记录或古气候替代性指标的旋回变化校正到天文目标曲线上所获得的具有绝对年龄的地质年代表 (标尺)。

“浮动”天文年代标尺 (Floating Astronomical Time Scale): 根据米兰科维奇旋回个数建立的具有相对时间概念的天文年代标尺,能用于确定地质事件的持续时间。浮动天文年代标尺与放射性同位素年龄相结合能够实现研究对象的数字年代标定。

1.2 地球轨道参数与气候变化

太阳系中地球与太阳、月亮和其他行星之间的万有引力作用导致地球绕太阳的公转运动和地球的自转轴发生(准)周期性的摄动,表现为地球轨道参数的地轴斜率 (Obliquity)、偏心率 (Eccentricity) 和岁差 (Precession) 发生近似周期性的变化。

地轴斜率即地球自转轴的倾角,在天球上表现为黄道面与赤道面的夹角(图 2)。地轴斜率值在 $22^{\circ}02' \sim 24^{\circ}30'$ (当前值为 $23^{\circ}27'$) 的范围内周期性变化,其变化主周期为 ~ 40 ka,次周期为 ~ 29 ka 和 ~ 54 ka(图 3)。地轴斜率的大小影响到地球上不同纬度和不同季节的气候差异程度大小,对极区影响大,对赤道影响小。如果地轴斜率为零,太阳将直射赤道,两极地区将永远处于微弱光照中,地球上不存在季节变化。地轴斜率增加,日照量的平均年纬度分布变得更加均匀,南北两极的极区范围扩大,增长极地冬夜的持续时间,季节性增强。

地球绕日公转的轨道为椭圆形,太阳位于椭圆

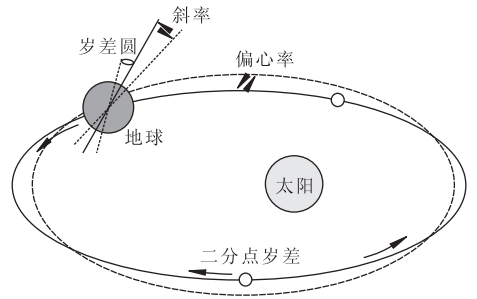


图 2 地球轨道参数示意(Pisias and Imbrie, 1986)

Fig. 2 The sketch showing the Earth orbital parameters

轨道的一个焦点上。偏心率值在 $0.0005 \sim 0.0607$ 范围内(现今值为 0.0167)周期性变化(图 2),变化周期分为 95 ka、 123 ka(平均为 100 ka)的短偏心率周期和 405 ka 的长偏心率周期(图 3)。当地球与火星相互靠近时,会导致岁差周期的短模式得到抑制,而长偏心率旋回的低岁差相则延长,所具有的周期为 ~ 2.36 Ma(图 3)。岁差又称章动,是指地球自转轴的进动(地球自转轴绕黄道轴旋转的运动),春分点沿黄道面向西移动,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。岁差具有 23 ka 和 19 ka 两个主周期。岁差本身并不能改变地球表面日照量分布,但偏心率与岁差结合时能改变太阳能量的分布。当某半球夏天处于近日点时,就经历了一个短而热的夏季和一个又长又冷的远日点冬季,即季节性增强。而相反的半球就有远日点的夏季和近日点的冬季,季节性不强。岁差周期的气候旋回,其幅度受偏心率调制。岁差变化对中低纬度气候影响大,对极区影响小。

由于地史时期以来月球—地球之间的距离不断加大,地球自转速度变慢,地轴斜率周期和岁差周期逐渐增大(Berger *et al.*, 1989, 1992)(图 4),但偏心率周期却保持相对稳定。尽管太阳系存在一定的混沌行为(Chaotic Behavior),但天文学家仍能够较精确地计算出地史时期地球轨道参数值,并可与地层记录的旋回特征进行对比。地球轨道参数的计算通常考虑两个因素,即地—月系统围绕太阳公转的轨道和地—月相互作用对地球轨道的影响。在法国天文学家 Le Verrier 提出了第一个线性化的计算地质历史时期地球轨道参数的方案后,不断有更精确的计算方案提出(Berger, 1988; Berger and Loutre, 1991; Laskar *et al.*, 1993, 2004; Varadi, 2003)。Laskar *et al.* (2004)提出的计算方案在一定程度上解决了太阳系的混沌行为,并考虑了潮汐摩

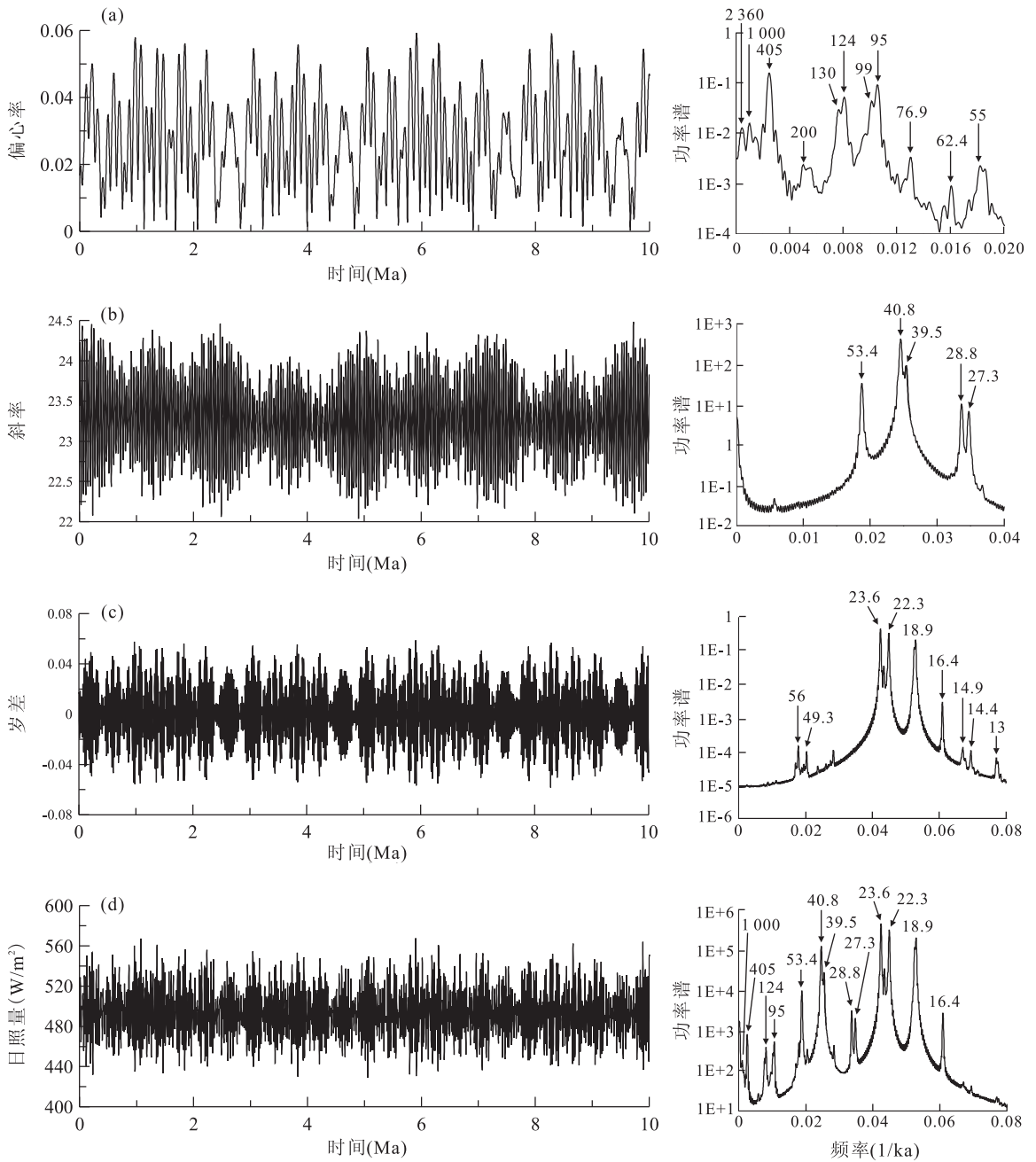


图 3 10 Ma 以来偏心率(a)、斜率(b)、岁差(c)和北纬 65°夏季日照量(d)变化曲线与主要周期

Fig. 3 Variations and main periods of eccentricity (a), obliquity (b), precession (c) and insolation of June 21 at 65°N (d) over the past 10 Ma

擦的影响因素. 他们指出地球受到金星和木星万有引力作用的结果, 使得长偏心率周期(405 ka)在地质历史时期非常稳定, 估计在 250 Ma 其计算误差仅为~500 ka.

1.3 沉积旋回与古气候变化替代指标

深入理解日照量、气候、沉积和轨道驱动力之间的关系对开展旋回地层学研究极为关键. 地球轨道参数变化导致地球表面接收到的太阳日照量发生周

期性变化, 并引起气候的周期性变化. 如图 5 所示, 日照量变化会改变大气环流的位置, 使气候带发生纬向移动. 气候又进一步直接或间接地控制风化作用、搬运作用和沉积作用. 大气温度和大气循环的变化可引起水温、海洋环流和降雨量的变化. 冰川活动、河流、风的强弱以及植被覆盖情况控制了风化程度和搬运作用. 日照量变化还可影响河流注入的淡水和营养物质的总量、蒸发作用、深海和湖泊的循环

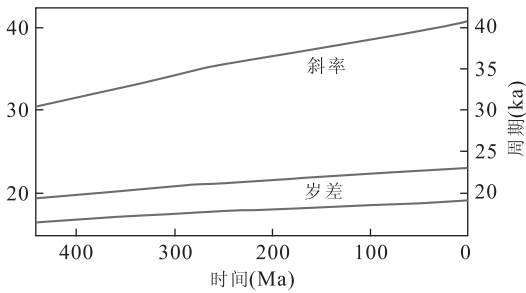


图 4 岁差和地轴斜率周期在地史时期的变化 (Berger *et al.*, 1989)

Fig. 4 Change of periodicities of obliquity and precession cycles with geologic time

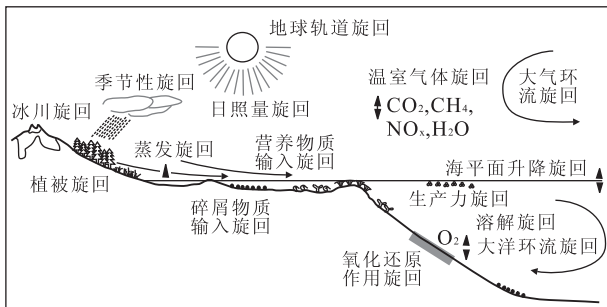


图 5 由地球轨道周期引起的地球表层系统的旋回过程 (Strasser *et al.*, 2006)

Fig. 5 Sketch illustrating the cycle processes of the earth surface system that is influenced by orbitally induced insolation changes

作用,以及水体化学性质等。所有这些紧密联系的因素都会最终控制沉积产物,并在地层中以岩性、地球物理和地球化学参数的旋回性表现出来。

古气候替代指标指的是能够反映过去气候变化的各类地球物理、地球化学等参数。由于气候变化与地球轨道参数之间的密切联系,因此从理论上来说,与气候变化相关联的参数均可作为旋回地层学分析的气候替代指标。主要的替代性指标包括:岩性变化、氧稳定同位素($\delta^{18}\text{O}$)、碳稳定同位素($\delta^{13}\text{C}$)、古生物指标(如生物的绝灭速率、生物更替、丰度等)、 CaCO_3 和 Al_2O_3 含量、粘土矿物组合、色率、磁化率及环境磁学参数、有机碳含量、粒度、声波测井、伽马测井、电阻率测井、密度测井、主量元素含量等等。

选择合适的古气候替代性指标对开展旋回地层学研究至关重要。需综合考虑以下因素:所选择的指标能否反映原始的气候变化信息 (Westphal *et al.*, 2010);进行长序列研究时采样、测样的时间成本和经济成本是否合适。例如,尽管 $\delta^{18}\text{O}$ 能够直接反映古温度和冰量的变化,但氧同位素保存的原始信息

容易受到成岩作用、淡水淋滤作用等的影响而遭到干扰和破坏,且测试成本较高。需要在野外露头上进行长序列采样(或采集数据)时,那些对样品要求低、测量快捷、经济、对样品无损的古气候替代指标特别受到青睐,如色率、磁化率及环境磁学参数 (Abels *et al.*, 2010; Lanci *et al.*, 2010)。而在一些含油气盆地,测井数据和岩心资料则是进行旋回分析的理想目标 (Wu *et al.*, 2009)。

1.4 旋回地层学研究方法

旋回地层学研究一般选择在地层连续、露头良好,且具有良好年代控制的剖面上进行。初步的年代学框架(生物地层学、磁性地层学、放射性同位素年代学等)是取得良好旋回地层学研究成果的保证。即使年代框架具有较大误差范围,它也能够让研究者大致估计出平均沉积速率,为判别旋回地层学分析的合理性提供独立的证据 (Hinnov, 2000; Weedon, 2003)。

对于显生宙沉积物来说,可将地球轨道参数的周期简化成岁差 20 ka,短偏心率 and 长偏心率分别为 100 ka 和 400 ka,这些周期的比例为 1 : 5 : 20。由于在地质历史时期斜率周期变化较大,需要根据具体研究剖面的地质年代来确定(图 4)。判别沉积旋回是否受到地球轨道力的影响,最常用的方法就是比较沉积旋回(或古气候替代指标)的旋回叠置方式及比值与地球轨道参数周期的比值是否相近 (Weedon, 2003)。

1.4.1 岩性直观识别方法 旋回地层学研究最直观的方法就是观察岩性和岩相的变化,通过纹层/层、层束、层束组和超层束组的组合特征、方式及级序结构来判别沉积过程是否受到地球轨道参数的影响 (Weedon, 2003; Fischer *et al.*, 2004)。例如龚一鸣等(2004)在广西上泥盆统弗拉阶—法门阶(F-F)之交盆地相和斜坡相碳酸盐岩地层序列中分辨出纹层、层束、层束组和超层束组 4 级旋回层,分别解释为亚米兰柯维奇旋回、岁差或斜率、短偏心率和长偏心率旋回,其中层束组与层束的级序结构之比为 1 : 6 或 1 : 3,超层束组与层束组的级序结构之比为 1 : 4。据此对弗拉阶至法门阶下部 12 个标准牙形石带进行了数字定年。

通过直接岩性观察来识别沉积旋回的级序结构和组合特征,要求研究者具有丰富的野外工作经验,研究剖面宏观上岩性和岩相变化频繁,易于识别。然而,并非所有的轨道参数变化都能够引起岩性或岩相的明显变化,尤其在深湖、远洋、半远洋等沉积环

境中,依靠岩性直观识别方法易于造成旋回信息的遗漏。

1.4.2 时间序列(time series)分析方法 一些地球物理、地球化学古气候替代指标要比岩性对环境变化的响应更加敏感.从地层中获得古气候替代指标类似于对沉积过程进行连续编码,也就是构建包含地层环境变化信息的时间序列(Schwarzacher, 1975).利用数学变换对时间序列进行定量分析的方法称为时间序列分析,这一方法的应用极大地推进了旋回地层学的发展。

(1)取样密度.由于时序分析的数据来自沉积物或者化石中,因此,设计好合适的取样密度对研究具有重要意义.取样密度过稀,则无法获得真实的旋回信息(图6);取样密度太大,则费时费力,成本过高.地层垂向上所代表的时间轴会受到沉积速率变化的影响,Weedon(2003)建议每个旋回应至少包含4个等间距分布数据点.在具体操作中,可根据初始年代框架估计出沉积速率和米兰科维奇旋回的旋回厚度,进而确定出取样密度.例如,如果沉积速率是5 cm/ka,对应的岁差旋回厚度约为100 cm,取样间隔至少应控制在25 cm以下。

(2)数据预处理.基于古气候替代指标所构建的时间序列还包含了各种环境“噪音”,有必要对数据进行预处理,使分析结果更易于解释.数据预处理分为以下几步:A.插值:多数分析软件和算法要求时间序列为等间距,因此不等间距的时间序列应首先进行插值处理;B.去均值:能量谱是估计不同频率信号离开零线的均方偏差,因此整个序列的均值应从每一个点去除;C.去趋势化:如果整个时间序列表现出趋势性变化,即逐渐增加或逐渐降低,那么在频谱分析之前需要将这个趋势值去除;D.去极值:时间序列有时会出现孤立的偏离均值很大的异常点(表现为极大值或极小值),会使能谱结构产生变形,影响正常估计.这种极值一般需要将其剔除,进行插值处理或以均值代替;E.预白化处理(pre-whitening):谱峰强度逐渐向高频降低的时间序列往往被描述为红噪,其低频部分谱峰强度大,高频部分谱峰强度小,压制了高频部分的信号.预白化处理就是要构建出一个新的时间序列,使其谱结构在各个频率上大致相当,其功能就是提高高频信号,压制低频信号,其实质类似于高通滤波。

(3)频谱分析、连续窗口频谱分析和小波分析.识别地层中米兰科维奇旋回信息的关键一步就是对时间序列进行频谱分析.频谱分析是将时间序列的

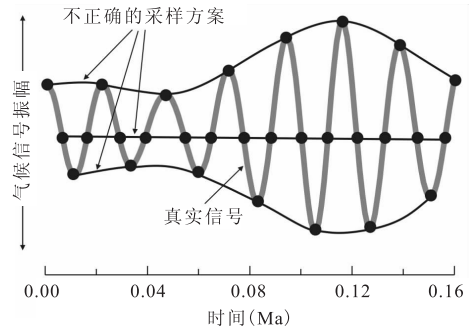


图6 采样密度、获取信号与真实信号的关系

Fig. 6 The relationship between sampling density, obtained signals and actual signal

信号强度按频率顺序展开,使其成为频率的函数,其目的就是要确定出时序信号中周期性或准周期性的成分.在初始年代框架内,如果确定出的谱峰周期之比与地球轨道参数的长、短偏心率、斜率和岁差的周期之比近似(1:4:10:20)(图3),就可以初步判定时间序列记录了米兰科维奇旋回信息(Hinnov, 2000; Weedon, 2003).常用的频谱分析方法有Blackman-Tukey法、多窗谱分析法(MTM法, multi-taper method)、Welch法、最大熵谱法等.不同的频谱分析方法所基于的算法不同,优缺点也各不相同,但计算结果基本一致。

尽管频谱分析方法能够对时间序列包含的主要频率(或周期)成分进行良好估计,但分析结果为一段时间(深度)内的平均谱结构,不能反映频率域随时间(深度)的变化信息,也无法反映出研究剖面沉积速率的变化情况.连续窗口频谱分析和小波分析方法则较好的解决了这一问题,可精确判断不同频率(周期)在时间(深度)域上的变化情况,有助于识别沉积速率变化和可能的沉积间断(Torrence and Compo, 1998)。

(4)滤波.滤波是对信号中特定波段频率滤除的操作,在旋回地层学研究中应用广泛.高通滤波和低频滤波可滤除时间序列中与米兰科维奇旋回无关的超高频和超低频信息,带通滤波能提取出目标频率信号(如岁差、斜率和偏心率旋回信号),将其与原始时间序列信号叠加在一起,以显示目标信号在时间(深度)域上的变化特征,以及与目标信号之间的相互关系。

(5)调谐.天文调谐就是将沉积或气候替代性指标的旋回记录对比到岁差、斜率和(或)偏心率的天文目标曲线上.精确的天文调谐首先要有通过其他年代学方法获得的年龄“锚点”,其次要准确判断出

古气候替代性指标与地球轨道参数之间的关系,即建立起由滤波获得的米兰科维奇旋回与天文目标曲线之间的相位关系。例如,新近纪地中海地区发育的腐泥层对应了岁差的最低值,日照量的最大值(Lourens *et al.*, 1996)。一旦将古气候替代指标的时间序列调谐到天文目标曲线上,就可以获得高分辨率的天文年代标尺。对于年龄控制较差的中生代或古生代地层来说,可根据不同频段米兰科维奇旋回的旋回个数建立具有相对时间概念的“浮动”天文年代标尺,用于确定地层或地质事件的持续时间。

1.4.3 开展旋回地层学研究应综合考虑的因素

地层记录中既包含了正常的环境变化信息,也包含了一些使其信号发生变形或失真的信息,例如沉积速率变化、生物扰动、滑塌作用和后期成岩作用等,因此在研究过程中还应注意以下因素:

(1)地层记录的完整性与连续性。由于沉积间断或剥蚀作用,地层中可能无法完全记录米兰科维奇旋回。在浅水台地和浅湖沉积环境中可能会出现间歇性的暴露,造成单个沉积旋回的部分缺失。即使在同一沉积盆地内,地层厚度和沉积相的侧向变化极为常见,滑塌作用和生物扰动等也会对沉积记录造成影响。因此,旋回地层学分析对一个剖面进行采样和研究是不够的,最好对至少两个侧向可对比的剖面进行对比研究,这在单位层型研究中显得尤为重要(Hilgen *et al.*, 2006)。

(2)原始米兰科维奇旋回的变形与失真。生物扰动作用和早期的成岩作用会影响到米兰科维奇旋回信息记录的完整性和原始性。沉积速率的变化会使原始信号发生变形,在频谱分析中会产生更多的谱峰(Hinnov, 2000)。而且,地球轨道信号在其通过大气圈层进入到沉积系统时并不是一个线性过程,可能会产生一些与原始输入信号频率不同的谐波或组合音(Riall, 2004)。就输入的轨道信号本身来说,一些轨道信号可能其初始信号强度太弱,或者是信号消减太快而无法记录在沉积系统中,最典型的例子就是岁差旋回。由于岁差受偏心率调制,在偏心率变小时岁差的振幅就急剧减小,造成沉积地层中的岁差旋回记录不明显。

(3)自旋回(Autocyclicity)问题。自旋回是指发生在沉积系统内区域性或地方性的,与地球轨道力无关的旋回性沉积(Schwarzacher, 2000)。自旋回主要由环境旋回所致,易于在近源沉积系统中发生(如河道和三角洲迁移)。旋回地层学研究中应充分注意自旋回对米兰科维奇旋回的影响。

(4)旋回地层学与层序地层学的关系。旋回地层学和层序地层学在科学目标、研究内容和研究方法上都存在着根本区别(龚一鸣等, 2008),但两者也存在一定联系。例如,一些学者将超长周期的天文旋回(0.4 Ma, 1.0 Ma 和 2.4 Ma 的偏心率旋回, 1.2 Ma 的斜率旋回)与层序地层学中的三级层序联系起来(Strasser *et al.*, 2000; Gale *et al.*, 2002)。这种联系具有极大的应用潜力,可以提高区内或不同区域的层序对比,并可能有助于探讨全球海平面升降的等时性(Miall and Miall, 2001)。

(5)不同地区和沉积环境的米兰科维奇旋回对比问题。由于不同沉积环境或气候带地球轨道信息的记录方式不同,而且各种环境中米兰科维奇旋回本身显示出的是特征一致的旋回信息,因此对不同沉积环境,尤其是跨区域或海、陆相的米兰科维奇旋回进行对比是极为困难的。要进行类似对比时,必须要在高精度的放射性年龄和磁性地层学研究的基础上进行,后者不受沉积环境的影响,能够提供进行全球对比的年代界线。

1.5 旋回地层学的应用及意义

旋回地层学研究有助于深刻认识地球轨道参数引起的气候过程与海洋、湖泊沉积系统和生物更替的关系,通过天文调谐获得的高精度地质年代标尺对解决地球科学多个领域的关键问题提供了极为有效和强大的工具。

(1)完善国际地质年代表。全球标准层型剖面 and 点(GSSP)强调了指定剖面上的唯一时间标志,是两个已命名的全球标准年代地层单位间地层界线的典型和标准,但 GSSP 本身不能对地质年代表实现绝对年龄的标定。天文调谐能够获得极为稳定的绝对年龄标尺,为 GSSP 提供更加精确的绝对年龄。在经过天文调谐的新近纪地质年代表中(Lourens *et al.*, 2004),上新世—更新世的年代与 Lourens *et al.* (1996)调谐获得的年代仅有 1 ka 的差别。这个微小的差别主要是来自古气候记录的调谐目标曲线—天文解决方案 La93 和 La2004 的差别(Laskar *et al.*, 1993, 2004)。天文年代调谐方法还成功的应用于陆相地层中,并且实现了高分辨率的海、陆相地层对比(Van Vugt *et al.*, 1998; Lu *et al.*, 1999; Heslop *et al.*, 2000)。

目前,新近纪以来的天文年代表已经完全调谐到天文理论曲线上(Lourens *et al.*, 2004)。由于潮汐摩擦作用对岁差和斜率周期的影响,古近纪天文年代标尺的建立依赖于偏心率参数,并相应调谐到

天文理论曲线上(Westhold *et al.*, 2008). 对于中生代来说, 由于火星和地球轨道谐振作用可能发生改变, 使得 ~ 100 ka的短偏心率周期也发生改变, 但405 ka的长偏心率周期保持稳定并可能一直持续到250 Ma, 因此中生代的地质年代代表可以用405 ka的周期进行调谐(Laskar, 2006). 对于更老的年代, “浮动”天文年代标尺能够大致确定出研究地层或地质事件的持续时间.

(2)精确估计重大地质事件的持续时间. 尽管现代放射性同位素定年技术能够获得高精度的绝对年龄, 但合适的定年对象很难从沉积地层的每个层位获得. 米兰科维奇旋回所具备的时间特性能够实现地层连续的时间标定, 高精度地估计出地质事件的持续时间. 例如, 旋回地层学多次应用于估计发生在白垩纪 Cenomanian-Turonian 期界线附近第二次大洋缺氧事件(OAE2)的持续时间, 其结果包括来自美国科罗拉多的 ~ 720 ka(Sageman *et al.*, 2006), 加拿大西部的 ~ 320 ka(Prokoph *et al.*, 2001)和摩洛哥 Tarfaya 盆地的 ~ 440 ka(Kuhnt *et al.*, 2005).

(3)为地磁倒转极性带提供精确的天文年代标定, 获得天文极性年代表(Astronomical Polarity Time Scale, APTS). 旋回地层学方法对于确定地球磁场倒转史的极性漂移事件和短时极性亚带的年代和发生次数尤为有效(Langereis *et al.*, 1997; Abdul Aziz and Langereis, 2004). 天文极性年代表还可以更加准确和精确地计算洋壳的扩张速率(Wilson, 1993; Krijgsman *et al.*, 1999). 晚侏罗世(170 Ma)至早白垩世(120 Ma)期间的极性年代表是在洋壳稳定扩张的假设下推测获得的, 因此不可能利用磁异常条带来确定大洋盆地的扩张速率. 旋回地层学可能为沉积记录中地磁极性带的持续时间提供独立的年代学证据. 将其与相应的海洋磁异常条带进行对比, 能使我们深入理解全球洋壳扩张速率与长周期气候和海平面变化、大气 CO_2 含量、风化速度、大陆边缘构造等的关系(Hardie, 1996; Boulila *et al.*, 2008; Huang *et al.*, 2010).

(4)对氧同位素期次和微体古生物化石带进行天文年代标定. Lisiecki 和 Raymo(2005)合成了全球57个钻孔5.3 Ma以来的氧同位素数据, 并将其调谐到北纬 65° 夏季日照量曲线上. 中中新世的氧同位素数据也实现了高精度的天文调谐, 并且深海氧同位素记录显示了明显的斜率和岁差-偏心率贡献的变化(Holbourn *et al.*, 2005, 2007). 经过天文调谐的剖面还能够用于建立起高精度的生物年代地

层框架, 获得新近纪海相生物事件地层的年龄, 以增强海洋高分辨率地层工作的准确性(Raffi *et al.*, 2006; 李前裕等, 2007). 结合其他地层学方法, 旋回地层学还实现了更精细地确定盆间或盆内生物带的穿时性和等时性(Hilgen *et al.*, 2000; Lirer and Iaccarino, 2005; Heckel *et al.*, 2005).

(5)天文年代标尺与放射性同位素年龄的相互校正. 2004版的国际地质年代表的年龄标定利用了不同的定年方法, 主要为U/Pb法、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法和天文调谐法. 其中 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年是新生代放射性定年方法中使用最广泛的一种. 理论上 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法定年精度可达到0.2%甚至更佳, 但由于标样年龄和K放射性衰变速率的不确定, 定年误差往往达到 $\sim 2.5\%$ (Min *et al.*, 2000). Kuiper *et al.* (2008)在确定摩洛哥晚中新世 Messadit 剖面精确天文年代的基础上, 获得了该剖面数个火山灰层单颗粒透长石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄, 通过年龄对比显示两者之间有 $\sim 0.8\%$ 的系统误差, 天文年龄要略老一些, 由此获得 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄的校正系数, 并计算出大多数实验室采用的 Fish Canyon 透长石标样的年龄为 28.201 ± 0.046 Ma. 该标样原先广泛接受的年龄为 28.02 ± 0.56 Ma, 由此将 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 定年方法的绝对误差减小到0.25%.

(6)长轨道周期(0.4 Ma、1.0 Ma和2.4 Ma的偏心率周期和1.2 Ma的斜率周期)对构造尺度的环境变化、生物更替的影响. 大量研究成果揭示出长轨道周期与层序地层学中的三级层序具有相关性, 这有助于深入理解三级层序海平面升降的机制, 以及他们对全球年代地层对比的潜力(Lourens and Hilgen, 1997; Turco *et al.*, 2001; Zachos *et al.*, 2001; Wade and Pälike, 2004; Lourens *et al.*, 2005). 长轨道周期的气候驱动力也可能控制了陆相盆地的沉积过程(Olsen and Kent, 1999; Abels *et al.*, 2010). Van Dam *et al.* (2006)还发现新近纪小型哺乳动物的绝灭和更替与长轨道周期存在相关性.

(7)提高对地史时期天文动力学的认识. 旋回地层学体现了天文科学与地球科学的交叉. 一方面, 天文学家所建立的地球轨道参数解决方案为开展天文调谐提供了理论依据; 另一方面, 过去天文动力学变化的证据只能在地层记录中获得. 正是地球科学家与天文学家的密切合作使得建立250 Ma以来的太阳系动力学行星模型成为可能(Laskar *et al.*, 2004).

2 中国旋回地层学研究进展与展望

中国学者已经注意到天文旋回方法应用于地层学研究的巨大潜力,并在不同时期对旋回地层学的研究进展及其年代地层学意义进行了总结(陈代钊, 2000;李前裕和汪品先, 2005;徐道一, 2005;徐道一等, 2006;汪品先, 2006;李前裕等, 2007;龚一鸣等, 2008).各研究团队对不同时代的地层开展了卓有成效的旋回地层学研究,取得的成果主要体现在以下几个方面:(1)建立了新近纪以来中国南海海洋沉积的天文年代标尺(Tian *et al.*, 2002, 2008;田军等, 2005a, 2005b),探讨了南海地区的东亚季风演化、上层海水结构变化的地球轨道参数驱动机制(田军等, 2004, 2005c; Tian *et al.*, 2006);(2)对中国北方多个黄土剖面的粒度参数进行天文调谐(Ding *et al.*, 1994, 2002; Lu *et al.*, 1999),确定出晚新生代亚洲内陆的古气候干湿变化由地球轨道参数控制的太阳辐射变化控制(鹿化煜等, 2009);(3)对广西晚古生代上泥盆统弗拉阶—法门阶的多个盆地相和斜坡相剖面实现天文年代定年,确定出弗拉阶—法门阶之交生物灭绝事件的持续时间为 ~ 450 ka (Gong *et al.*, 2001; Chen and Tucker, 2003; 龚一鸣等, 2004),并在中国华南二、三叠纪界线之交识别出显著的米兰科维奇旋回记录(童金南和殷鸿福, 1999; Yang and Lehrmann, 2003; 陈建业等, 2007; 郭刚等, 2007; 彭兴芳等, 2007);(4)在新疆吐哈盆地侏罗纪(姚益民等, 2003)、鄂尔多斯盆地晚三叠世(张小会和赵重远, 2002)、松辽盆地晚白垩世(Wu *et al.*, 2007, 2009; 程日辉等, 2008; 吴怀春等, 2008)、东营凹陷沙河街组和明化镇组(姚益民等, 2007; 徐道一等, 2008)等河流相和湖相地层中识别出米兰科维奇旋回,并进行建立陆相天文年代标尺的尝试(Wu *et al.*, 2009).

国际上旋回地层学研究正在迅猛发展,其成果主要集中在利用米兰科维奇旋回的时间特性完成中、新生代天文年代标尺的调谐工作,并逐渐向古生代推进(Hinnov and Ogg, 2007).中国主要地块中生代以来主要为陆相沉积,与海相地层进行对比主要依靠放射性年代学和磁性地层学.古生界以海相沉积为主,沉积较为连续,并有多个“金钉子”落户华南.因此,中国中、新生代陆相地层的旋回地层学研究应选择有高精度绝对年龄和详细磁性地层学研究基础的剖面,而古生代海相地层的旋回地层学研究是未来的研究重点.当前应着重研究那些综合地层

学研究程度高的剖面,并逐渐将旋回地层学成果应用于完善中国地质年代表.笔者认为当前中国旋回地层学的研究应选择发生重大地质事件的关键地史时期进行,以松辽盆地的陆相白垩系和中国华南乐平统一—中三叠统为例说明.

2.1 松辽盆地陆相白垩系旋回地层学研究及高精度对比

白垩纪以极端的温室气候为特征(Tarduno, 1998; Skelton, 2003),据估计晚白垩世 Turonian 期地球表面平均温度要比现今高出约 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Huber *et al.*, 1995; Wilson *et al.*, 2002),南北两极均不发育冰盖.同时,白垩纪还发生了一系列重大地质事件,如超级磁静期(Helsley and Steiner, 1969; Cronin *et al.*, 2001),大规模火山活动(Larson, 1991; Jones and Jenkyns, 2001),大洋缺氧事件和黑色页岩(Schlanger and Jenkyns, 1976; Jenkyns, 1980),大洋富氧事件与大洋红层等(Hu *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005).一直以来,地球科学家努力解开白垩纪重大地质事件产生的原因以及他们之间的联系,但仍存较大争议.

白垩纪的重大地质事件主要从海相地层中揭示出来.作为地球表层系统的一部分,陆相地层必然也受到地球表层系统重大地质事件的影响与控制(王成善, 2006; 王成善等, 2008).中国东北的松辽盆地是世界上最大的白垩纪湖相盆地之一,发育了完整的白垩纪地层.中国大陆钻探松科 1 井的主要科学目标之一就是研究松辽盆地对全球古气候、古环境和重大地质事件的响应,从而更好的理解白垩纪时期的温室气候及重大地质事件的关系,以及地球系统的全球变化(王成善等, 2008; Wang *et al.*, 2009).可靠的年代学框架是弄清松辽盆地白垩系对全球地质事件的响应,以及实现海、陆相地质记录高精度对比的关键.由于缺乏理想的放射性同位素定年对象,以及海陆相生物地层的对比较为困难,长期以来松辽盆地缺乏可靠的年代框架.

多项研究表明松辽盆地白垩系记录了良好的米兰科维奇旋回,适于开展旋回地层学研究. Wu *et al.* (2007) 利用频谱分析方法首先对松辽盆地不同凹陷区的青山口组 1 段和嫩江组 1-2 段进行了尝试性的旋回地层学研究,揭示出良好的米兰科维奇旋回.王璞珺教授及其团队分别对松科 1 井南井不同地层单元的岩性进行了精细描述,识别出可能由地球轨道参数变化引起的不同级次的岩性旋回(程日辉等, 2008, 2009; 王璞珺等, 2009; 王国栋等, 2009;

高有峰等,2009)。随后,Wu *et al.* (2009)对松辽盆地不同构造区10口钻井的青山口组的自然伽玛数据进行了详细的旋回地层学研究,通过频谱分析、小波分析和滤波处理,获得了各钻井青山口组的持续时间和平均沉积速率。其中松科1井的青山口组记录了约12.8个长偏心率旋回,51.6个短偏心率旋回,其沉积持续时间为5.20 Ma(吴怀春等,2008; Wu *et al.*, 2009)。

松科1井(南井与北井)连续钻取了上白垩统的泉头组三段至明水组的岩心(Wang *et al.*, 2009),而最近由国际大陆钻探计划(ICDP)批准的SK-III钻探项目将获得火石岭组至泉头组的连续岩心,人们有望从松辽盆地获得世界上最为连续、完整的陆相白垩系岩心记录。基于放射性同位素年代学和磁性地层学研究所提供的绝对年龄框架,开展详细的旋回地层学研究有可能为松辽盆地提供具有绝对年代学意义的天文年代标尺,从而实现与海相地层在0.4 Ma级别上的高精度对比。

2.2 中国华南乐平世—中三叠世高分辨率旋回地层学研究

发生于二叠纪乐平世—早三叠世之交的生物大灭绝事件是显生宙以来五次大型灭绝事件中规模最大的一次,又被称为“大灭绝”(Great Dying)或“大灭绝之母”(Mother of all mass extinctions)(Erwin, 1993)。当时地球上70%的陆生脊椎动物和高达90%的海洋生物绝灭(Benton, 2005),并发生了地史时期已知惟一一次昆虫的大量绝灭(Labandiera and Sepkoski, 1993)。但不同种类生物的灭绝过程具有不同特点和模式,海生无脊椎动物的灭亡程度最大。其中,具有碳酸钙外壳,循环系统和代谢系统发育不好的海洋生物受到的影响最为严重,而较少或无钙质骨骼、循环系统和气体交换系统发育良好的生物存活下来的比例相对要高(Knoll *et al.*, 1996)。不同生物群发生灭绝的高峰在时间上存在差异,如介形纲与腕足动物的大规模灭绝的时间可能相差了72~122万年(Rampino *et al.*, 2000)。除了在二叠—三叠纪界线附近(~252.6 Ma)发生了大灭绝事件外,瓜德鲁普末期(~259 Ma)也发生了海洋底栖生物的大量灭绝事件。但对于两者是属于具有内在联系的两期灭绝事件还是无关联的独立灭绝事件,仍然存在较大争议(Jin *et al.*, 2000; Wang and Sugiyama, 2000; Yin *et al.*, 2007; Bottjer *et al.*, 2008; Shen *et al.*, 2010)。

大灭绝后生态系的复苏历时明显长于显生宙的

各大绝灭事件(Erwin, 1993; de Wit *et al.*, 2002),是古、中生代之交地史转折期最显著的标志之一。研究表明地表生态系统在灭绝事件后400万到600万年的中三叠世才开始复原(Lehrmann *et al.*, 2006),直到晚三叠世才完全复原(Sahney and Benton, 2008)。迟缓复苏的原因可能是由灭绝期及其后长期的灾难性环境(如广泛缺氧)和灭绝事件导致的生态危机强度引起(Droser *et al.*, 2000; Twitchett *et al.*, 2004),但仍需进一步的全面研究(童金南和王德辉,2005;童金南和殷鸿福,2009)。

二叠纪末生物大灭绝和其后复苏期间还发生了一系列特殊的地质、地球物理和地球化学事件,主要包括:大规模火山喷发(Courtillot *et al.*, 1999)、P-T界线上大量微细草莓状黄铁矿的出现(Bond and Wignall, 2010)、早、中三叠世长期的成煤间断(Retal-lack *et al.*, 1996)、碳稳定同位素的多期次大幅度漂移(Payne *et al.*, 2004; Korte and Kozur, 2010)、硫同位素降低(Newton *et al.*, 2004)、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 的大幅度变化(Korte *et al.*, 2003)、古土壤类型的改变(Krull and Retallack, 2000),气候变迁等(Kiehl and Shields, 2005)。对于灭绝事件发生的成因也存在多种解释,如大型陨石撞击事件(Becker *et al.*, 2004)、大规模火山爆发(Saunders and Reichow, 2009; Wignall *et al.*, 2009)、甲烷气水合物释放(Retal-lack and Krull, 2006)、海平面升降(Erwin, 1993)、海洋缺氧(Wignall and Twitchett, 2002)等。

可见,尽管在世界范围内人们对二叠纪晚期的大灭绝事件开展了详尽的研究,但各种争议仍持续不断,而引起这些争议的主要原因之一就是各种事件绝对年代和持续时间的确定还不够精确(Bowring *et al.*, 1998; Mundil *et al.*, 2004)。中国华南数个二叠、三叠系剖面上的火山灰层为获得高精度绝对年龄提供了绝佳条件。Claoue-Long *et al.* (1991)在煤山剖面的25层获得了SHRIMP U-Pb锆石年龄为 251.1 ± 3.4 Ma。Renne *et al.* (1995)从煤山剖面25层中获得的斜长石和透长石的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄为 250 ± 1.5 Ma。Bowring *et al.* (1998)从华南煤山和其他两个剖面的一系列火山灰层中获得了与地层序列一致的U-Pb锆石年龄,并给出煤山P-T界线的年龄大约为 251.4 ± 0.3 Ma。然而,Mundil *et al.* (2001, 2004)对Bowring *et al.* (1998)的结果提出了质疑,认为煤山剖面的锆石发生了广泛的铅丢失,并可能受到捕获晶的污染。Mundil *et al.* (2004)对煤山剖面28层的1个样品

和上寺剖面的 8 个样品经过化学方法的预处理,也获得了一套与地层一致的 U-Pb 年龄,并确定出(a)生物危机发生在 ~ 252.6 Ma;(b)吴家坪阶—长兴阶的界线年龄为 256 Ma;(c)吴家坪阶的底界年龄和瓜德鲁普阶末期的灭绝事件的年龄要早于 260 Ma;(d)P-T 界线之下碳稳定同位素负偏的持续时间可能达到 2 Ma. Lehrmann *et al.* (2006)在贵州南盘江盆地的早、中三叠世界线附近获得 4 个 U-Pb 锆石年龄,确定出早、中三叠世的界线年龄为 247.2 Ma,据此确定出早三叠世的持续时间约为 5 Ma,为大灭绝后生态复苏和碳稳定同位素漂移的持续时间提供了约束.最近,Shen *et al.* (2010)系统总结了瓜德鲁普期—长兴期的年代学数据,确定出吴家坪阶底部年龄约为 259 Ma,长兴阶与吴家坪阶的界线年龄约为 254 Ma.

显然,高精度的放射性绝对年龄为理解二叠纪末的大灭绝事件提供了极佳的年代约束.同时我们也应该注意到尽管目前锆石 U-Pb 年龄的分析精度可以达到 1‰~3‰的水平,但对于二叠、三叠纪界线附近的火山灰层锆石来说,仍无法正确评价 1‰~3‰水平上铅丢失的复杂性,如果再考虑岩浆的冷却时间,其误差可能会更大(Mundil *et al.*, 2004).因此,Mundil *et al.* (2004)认为 U-Pb 锆石年龄难以对灭绝速率及持续时间进行合适的估计.另一方面,火山灰层仅在有限的层位中出现,对各种事件的持续时间也只能通过内插法进行大致的估计.

众多学者对华南乐平世—早三叠世地层开展了初步的旋回地层学研究,揭示出良好的米兰科维奇旋回.童金南和殷鸿福(1999)对浙江长兴煤山剖面早三叠世殷坑组与和龙山组下部的岩性特征进行了尝试性的旋回地层学研究.彭兴芳等(2007)和陈建业等(2007)分别对广西东攀深水相的二叠系—三叠系界线剖面的地球化学指标和岩石磁学参数进行频谱分析,确定出沉积旋回由地球轨道参数控制. Yang and Lehrmann(2003)对贵州南盘江盆地早三叠世 Olenekian 期碳酸盐岩台地内部及边缘相的地层进行了旋回地层学研究,识别出偏心率、斜率和岁差的旋回信号,并对地层的沉积持续时间做出了估计.郭刚等(2007)对安徽巢湖早三叠世印度期殷坑组的磁化率剖面进行频谱分析和小波分析,识别出米兰科维奇旋回,并估计出印度期的持续时间约为 1.1 Ma.这些研究为解释华南乐平世—早三叠世地层旋回的古气候变化成因解释提供了重要证据,也为进一步开展旋回地层学研究提供了良好的研究基础.

中国华南乐平世—中三叠世地层沉积连续,拥有三个全球层型剖面 and 点(GSSP),是研究二叠纪/三叠纪之交绝灭事件和生态复苏的理想地区(Yin *et al.*, 2001; Jin *et al.*, 2006a, 2006b).因此,对二叠系乐平统一—中三叠统开展进一步的旋回地层学研究,并结合已有的放射性同位素年代学、生物地层学和磁性地层学成果,建立乐平世—中三叠世的连续天文年代标尺,对确定生物灭绝过程、灭绝速度和生态复苏,以及成因解释等具有重要意义.同时,将为确定国际地质年代表乐平世—中三叠世各期的界线年龄提供重要参考.

3 结语

作为一门正在发展中的学科,旋回地层学的研究方法和相关术语有待进一步规范,地球轨道参数与地球表层系统之间的耦合关系也需要更进一步的认识,但旋回地层学研究为人类在万年尺度上认识和理解地球系统科学提供了前所未有的机遇.国际地层委员会即将完成国际地质年代表中显生宙建阶的工作,而旋回地层学研究有可能是下一步的研究重点,即在阶划分的基础上进行更进一步的划分,精确确定各阶的持续时间和界线年龄.相信随着天文解决方案的不断完善,地球轨道参数的计算将会更加精确,在不久的将来有可能实现整个显生宙地质年代表的天文调谐.

References

- Abdul Aziz, H., Langereis, C. G., 2004. Astronomical tuning and duration of three new subchrons (C5r. 2r-1n, C5r. 2r-2n and C5r. 3r-1n) recorded in a Middle Miocene continental sequence from NE Spain. *Geophysical Monographs*, 145: 141—160.
- Abels, H. A., Abdul Aziz, H., Krijgsman, W., et al., 2010. Long-period eccentricity control on sedimentary sequences in the continental Madrid basin (Middle Miocene, Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 220—231. doi:10.1016/j.epsl.2009.11.011
- Adhémar, J. A., 1842. Révolutions des mers; déluges périodiques. Publication Privée, Paris.
- Becker, L., Poreda, R. J., Basu, A. R., et al., 2004. Bedout: a possible end-Permian impact crater offshore of north-western Australia. *Science*, 304(5676): 1469—1476.
- Benton, M. J., 2005. When life nearly died; the greatest mass extinction of all time. Thames & Hudson, London.

- Berger, A., 1988. Milankovitch theory and climate. *Review of Geophysics*, 26: 624 — 657. doi: 10. 1029/RG026i004p00624
- Berger, A., Loutre, M. F., 1991. Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Review*, 10: 297 — 317. doi: 10. 1016/0277 — 3791(91) 90033—Q
- Berger, A., Loutre, M. F., Dehant, V., 1989. Astronomical frequencies for pre-Quaternary palaeoclimate studies. *Terra Nova*, 1: 474—479. doi: 10. 1111/j. 1365—3121. 1989. tb00413. x
- Berger, A., Loutre, M. F., Laskar, J., 1992. Stability of the astronomical frequencies over the Earth's history for paleoclimate studies. *Science*, 255: 560 — 566. doi: 10. 1126/ science. 255. 5044. 560
- Bond, D. P. G., Wignall, P. B., 2010. Pyrite framboid study of marine Permian-Triassic boundary sections: a complex anoxic event and its relationship to contemporaneous mass extinction. *GSA Bulletin*, 122(7—8): 1265 — 1279. doi: 10. 1130/B30042. 1
- Bottjer, D. J., Clapham, M. E., Fraiser, M., et al., 2008. Understanding mechanisms for the end-Permian mass extinction and the protracted Early Triassic aftermath and recovery. *GSA Today*, 18: 4 — 10. doi: 10. 1130/GSATG8A. 1
- Boulila, S., Hinnov, L. A., Huret, E., et al., 2008. Astronomical calibration of the Early Oxfordian (Vocontian and Paris basins, France): consequences of revising the Late Jurassic time scale. *Earth and Planetary Science Letters*, 276(1—2): 40—51. doi: 10. 1016/j. epsl. 2008. 09. 006
- Bowring, S. A., Erwin, D. H., Jin, Y. G., et al., 1998. U/Pb zircon geochronology and tempo of the end-Permian mass extinction. *Science*, 280(1039): 1039 — 1045. doi: 10. 1126/science. 280. 5366. 1039
- Bradley, W. H., 1929. The varves and climate of the Green River epoch. *U. S. Geological Survey, Professional Paper*, 158: 87 — 110. doi: 10. 1016/S0031 — 0182(02) 00716—2
- Chen, D. Z., 2000. Cyclostratigraphy: a developing theory. *Quaternary Sciences*, 20(2): 186—195 (in Chinese with English abstract).
- Chen, D. Z., Tucker, M. E., 2003. The Frasnian-Famennian mass extinction: insights from high-resolution sequence stratigraphy and cyclostratigraphy in South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 193: 87—111.
- Chen, J. Y., Feng, Q. L., Chen, J., et al., 2007. Cyclostratigraphy and stratigraphic correlation based on rock-magnetic parameters on the Permian-Triassic boundary in the Dongpan Section in Guangxi. *Journal of Stratigraphy*, 31(4): 309—316 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, R. H., Wang, G. D., Wang, P. J., 2008. Sedimentary cycles of the Cretaceous Quantou-Nenjiang Formations and Milankovitch cycles of the South Hole of the SL-CORE-I in the Songliao basin. *Acta Geologica Sinica*, 28(1): 55—64 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, R. H., Wang, G. D., Wang, P. J., et al., 2009. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the Yaojia Formation recovered by CCSD-SK-Is borehole in Songliao basin: lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 272 — 287 (in Chinese with English abstract).
- Claoue-Long, J. C., Zhang, Z. C., Ma, G. G., et al., 1991. The age of the Permian-Triassic boundary. *Earth and Planetary Science Letters*, 105: 182—190. doi: 10. 1016/0012—821X(91)90129—6
- Courtillot, V., Jaupart, C., Manighetti, I., et al., 1999. On causal links between flood basalt and continental break up. *Earth and Planetary Science Letters*, 166: 177 — 195. doi: 10. 1016/S0012—821X(98)00282—9
- Croll, J., 1864. On the physical cause of the change of the climate during geological epochs. *Philosophical Magazine*, 28: 121—137.
- Croll, J., 1875. Climate and time in their geological relations. Appleton, New York.
- Cronin, M., Tauxe, L., Constable, C., et al., 2001. Noise in the quiet zone. *Earth and Planetary Science Letters*, 190: 13—30. doi: 10. 1016/S0012—821X(01)00354—5
- Crowley, T. J., 2002. Cycles, cycles everywhere. *Science*, 295: 1473—1474.
- De Geer, G., 1940. Geochronologia Suecica Principles. *Atlas with Plates*, 49—54.
- De Wit, M. J., Ghosh, J. G., De Villiers, S., et al., 2002. Multiple organic carbon isotope reversals across the Permo-Triassic boundary of terrestrial Gondwana sequences: clues to extinction patterns and delayed ecosystem recovery. *The Journal of Geology*, 110: 227 — 246. doi: 10. 1086/338411
- Ding, Z. L., Derbyshire, E., Yang, S. L., et al., 2002. Stacked 2. 6 Ma grain size record from the Chinese loess based on five sections and correlation with the deep-sea $\delta^{18}\text{O}$ record. *Paleoceanography*, 17(3): 1033. doi: 10. 1029/2001PA000725
- Ding, Z. L., Yu, Z. W., Liu, T. S., 1994. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits. *Quaternary Sci-*

- ence *Reviews*, 13(1):39–70. doi: 10.1016/0277–3791(94)90124–4
- Droser, M. L., Bottjer, D. J., Sheehan, P. M., et al., 2000. Decoupling of taxonomic and ecologic severity of Phanerozoic mass extinctions. *Geology*, 28: 675–678. doi: 10.1130/0091–7613(2000)28<675:DOTAES>2.0.CO;2
- Emiliani, C., 1955. Pleistocene temperatures. *Journal of Geology*, 63: 538–578.
- Emiliani, C., 1966. Paleotemperature analysis of Caribbean cores P6304-6 and P6304-9 and a generalized temperature curve for the past 425,000 years. *Journal of Geology*, 74: 109–126.
- Erwin, D. H., 1993. The great Paleozoic crisis: life and death in the Permian. Columbia University Press, New York.
- Fischer, A. G., D'Argenio, B., Premoli Silva, I., et al., 2004. Cyclostratigraphic approach to Earth's history: an introduction. *SEPM Special Publication*, 81: 5–13.
- Fischer, A. G., De Boer, P. L., Premoli Silva, I., 1988. Cyclostratigraphy. In: Beaudoin, B., Ginsburg, R. N., eds., Global sedimentary geology program: cretaceous resources, events, and rhythms. *NATO ASI Series, Kluwer*, 139–172.
- Gale, A. S., Hardenbol, J., Hathway, B., et al., 2002. Global correlation of Cenomanian (Upper Cretaceous) sequences: evidence for Milankovitch control on sea level. *Geology*, 30: 291–294. doi: 10.1130/0091–7613(2002)030<0291:GCOCUC>2.0.CO;2
- Gao, Y. F., Wang, P. J., Cheng, R. H., et al., 2009. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the first member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK-Is borehole in Songliao basin; lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(2): 314–323 (in Chinese with English abstract).
- Gilbert, G. K., 1895. Sedimentary measurement of Cretaceous time. *Journal of Geology*, 3: 121–127.
- Gong, Y. M., Du, Y. S., Tong, J. N., et al., 2008. Cyclostratigraphy: the third milestone of stratigraphy in understanding time. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(4): 443–457 (in Chinese with English abstract).
- 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. doi: 10.1016/S0031–0182(00)00257–1
- 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 (Ser. D)*, 48(1): 32–41. doi: 10.1360/03yd0025
- Guo, G., Tong, J. N., Zhang, S. H., et al., 2008. Cyclostratigraphy of the Induan (Early Triassic) in West Pingdingshan Section, Chaohu, Anhui Province. *Science in China (Ser. D)*, 51: 22–29. doi: 10.1007/s11430–007–0156–z
- Hardie, L. A., 1996. Secular variation in seawater chemistry: an explanation for the coupled secular variation in the mineralogies of marine limestones and potash evaporites over the past 600 m. y. *Geology*, 24: 279–284. doi: 10.1130/0091–7613(1996)024<0279:SVISCA>2.3.CO;2
- Hays, J. D., Imbrie, J., Shackleton, N. J., 1976. Variations in the Earth's orbit: pacemakers of the ice ages. *Science*, 194: 1121–1132. doi: 10.1126/science.194.4270.1121
- Heckel, P. H., Alekseev, A. S., Barrick, J. E., et al., 2005. Cyclothem (sequence-stratigraphic) correlation and biostratigraphy across the Moscovian-Kasimovian and Kasimovian-Gzhelian stage boundaries (Upper Pennsylvanian Series) in North America and Eurasia. *Newsletter on Carboniferous Stratigraphy*, 23: 36–44.
- Hedberg, H. D., 1976. International stratigraphic guide—a guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure. Wiley, New York.
- Helsley, C. E., Steiner, M. B., 1969. Evidence for long intervals of normal polarity during the Cretaceous period. *Earth and Planetary Science Letters*, 5: 325–332. doi: 10.1016/S0012–821X(68)80060–3
- Heslop, D., Langereis, C. G., Dekkers, M. J., 2000. A new astronomical time scale for the loess deposits of northern China. *Earth and Planetary Science Letters*, 184: 125–139. doi: 10.1016/S0012–821X(00)00324–1
- Hilgen, F. J., Krijgsman, W., Raffi, I., et al., 2000. Integrated stratigraphy and astronomical calibration of the Serravallian/Tortonian boundary section at Monte Gibliscemi, Sicily. *Marine Micropaleontology*, 38: 181–211. doi: 10.1016/S0377–8398(00)00008–6
- Hilgen, F. J., Schwarzacher, W., Strasser, A., 2004. Concepts and definitions in cyclostratigraphy (second report of the cyclostratigraphy working group). *SEPM Special Publication*, 81: 303–305.
- Hilgen, F., Brinkhuis, H., Zachariasse, W. J., 2006. Unit stratotypes for global stages: the Neogene perspective. *Earth-Science Reviews*, 74: 113–125. doi: 10.1016/j.earscirev.2005.09.003
- Hinnov, L. A., Ogg, J. G., 2007. Cyclostratigraphy and the

- astronomical time scale. *Stratigraphy*, 4: 239–251.
- Hinnov, L. A., 2000. New perspectives on orbitally forced stratigraphy. *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 28: 419–475.
- Hinnov, L. A., 2004. Earth's orbital parameters and cycle stratigraphy. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Smith, A. G., eds., *A geologic time scale 2004*. Cambridge University Press, Cambridge, 55–62.
- Holbourn, A., Kuhnt, W., Schulz, M., et al., 2005. Impacts of orbital forcing and atmospheric carbon dioxide on Miocene ice-sheet expansion. *Nature*, 438: 483–487. doi: 10.1038/nature04123
- Holbourn, A., Kuhnt, W., Schulz, M., et al., 2007. Orbitally-paced climate evolution during the Middle Miocene “Monterey” carbon-isotope excursion. *Earth and Planetary Science Letters*, 261: 534–550. doi: 10.1016/j.epsl.2007.07.026
- Hu, X. M., Luba, J., Wang, C. S., et al., 2005. Upper Cretaceous oceanic red beds (CORBs) in the Tethys: occurrences, lithofacies, age and environments. *Cretaceous Research*, 26: 3–20. doi: 10.1016/j.cretres.2004.11.011
- Huang, C. J., Hesselbo, S. P., Hinnov, L. A., 2010. Astrochronology of the Late Jurassic Kimmeridge clay (Dorset, England) and implications for Earth system processes. *Earth and Planetary Science Letters*, 289: 242–255. doi: 10.1016/j.epsl.2009.11.013
- Huber, B. T., Hodell, D. A., Hamilton, C. P., 1995. Middle-Late Cretaceous climate of the southern high latitudes; stable isotopic evidence for minimal equator-to-pole thermal gradients. *GSA Bulletin*, 107(10): 1164–1191. doi: 10.1130/0016-7606(1995)107<1164:MLCCOT>2.3.CO;2
- Jenkyns, H. C., 1980. Cretaceous anoxic events: from continents to oceans. *Journal of Geological Society of London*, 137: 171–188. doi: 10.1144/gsjgs.137.2.0171
- Jin, Y. G., Shen, S. Z., Henderson, C. M., et al., 2006b. The global stratotype section and point (GSSP) for the boundary between the Capitanian and Wuchiapingian stage (Permian). *Episodes*, 29: 253–262.
- Jin, Y. G., Wang, Y., Wang, W., et al., 2000. Pattern of marine mass extinction near the Permian-Triassic boundary in South China. *Science*, 289: 432–436. doi: 10.1126/science.289.5478.432
- Jin, Y. G., Wang, Y., Henderson, C. M., et al., 2006a. The global boundary stratotype section and point (GSSP) for the base of Changhsingian Stage (Upper Permian). *Episodes*, 29: 175–182.
- Jones, C. E., Jenkyns, H. C., 2001. Seawater strontium isotopes, oceanic anoxic events, and seafloor hydrothermal activity in the Jurassic and Cretaceous. *American Journal of Science*, 301: 112–149. doi: 10.2475/ajs.301.2.112
- Kiehl, J. T., Shields, C. A., 2005. Climate simulation of the Latest Permian: implications for mass extinction. *Geology*, 33(9): 757–760. doi: 10.1130/G21654.1
- Knoll, H., Bambach, R. K., Canfield, D. E., et al., 1996. Comparative Earth history and Late Permian mass extinction. *Science*, 26: 452–457. doi: 10.1126/science.273.5274.452
- Korte, C., Kozur, H. W., Bruckschen, P., et al., 2003. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67: 47–62. doi: 10.1016/S0016-7037(02)01035-9
- Korte, C., Kozur, H. W., 2010. Carbon-isotope stratigraphy across the Permian-Triassic boundary: a review. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39: 215–235. doi: 10.1016/j.jseaes.2010.01.005
- Krijgsman, W., Hilgen, F. J., Raffi, I., et al., 1999. Chronology, causes and progression of the Messinian salinity crisis. *Nature*, 400: 652–655. doi: 10.1038/23231
- Krull, E. S., Retallack, G. J., 2000. $\delta^{13}\text{C}$ depth profiles from paleosols across the Permian-Triassic boundary: evidence for methane release. *GSA Bulletin*, 112(9): 1459–1472. doi: 10.1130/0016-7606(2000)112<1459:CDPFPA>2.0.CO;2
- Kuhnt, W., Luderer, F., Nederbragt, S., et al., 2005. Orbital scale record of the late Cenomanian-Turonian oceanic anoxic event (OAE2) in the Tarfaya basin (Morocco). *International Journal of Earth Sciences (Geol Rundsch)*, 94: 147–159. doi: 10.1007/s00531-004-0440-5
- Kuiper, K. F., Deino, A., Hilgen, F. J., et al., 2008. Synchronizing rock clocks of Earth history. *Science*, 320: 500–504. doi: 10.1126/science.1154339
- Labandeira, C. C., Sepkoski, J. J., 1993. Insect diversity in the fossil record. *Science*, 261: 310–315. doi: 10.1126/science.11536548
- Lanci, L., Muttoni, G., Erba, E., 2010. Astronomical tuning of the Cenomanian Scaglia Bianca Formation at Furlo, Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 292: 231–237. doi: 10.1016/j.epsl.2010.01.041
- Langereis, C. G., Dekkers, M. J., de Lange, G. J., et al., 1997. Magnetostratigraphy and astronomical calibration of the last 1.1 Myr from an eastern Mediterranean piston core and dating of short events in the Brunhes. *Geophysical Journal International*, 129: 75–94. doi: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb00938.x
- Larson, R. L., 1991. Latest pulse of the Earth: evidence for a

- mid-Cretaceous superplume. *Geology*, 19: 547 – 550. doi: 10.1130/0091-7613(1991)019<0547:LPOEEF>2.3.CO;2
- Laskar, J., 2006. Astronomical limits in using orbital tuning methodology for the geologic time scale. In: international association of mathematical geology: meeting on quantitative geology from multiple sources, 3–8 September, Liège, Belgium.
- Laskar, J., Joutel, F., Boudin, F., 1993. Orbital, precessional, and insolation quantities for the Earth from –20 Myr to +10 Myr. *Astronomy & Astrophysics*, 270: 522 – 533.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A long term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy & Astrophysics*, 428: 261 – 285. doi: 10.1051/0004-6361:20041335
- Lehrmann, D. J., Ramezan, J., Bowring, S. A., et al., 2006. Timing of recovery from the end-Permian extinction: geochronologic and biostratigraphic constraints from South China. *Geology*, 34: 1053 – 1056. doi: 10.1130/G22827A.1
- Li, Q. Y., Lourens, L., Wang, P. X., 2007. New ages for Neogene marine biostratigraphic events. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 197 – 208 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. Y., Wang, P. X., 2005. Recognizing the stratigraphic and paleoclimatic significance of eccentricity cycles. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 519 – 528 (in Chinese with English abstract).
- Lirer, F., Iaccarino, S., 2005. Integrated stratigraphy (cyclostratigraphy and biochronology) of late Middle Miocene deposits in the Mediterranean area and comparison with the North and Equatorial Atlantic Oceans: synthesis of major results. *Terra Nova*, 17: 338 – 349. doi: 10.1111/j.1365-3121.2005.00619.x
- Lisiecki, L. E., Raymo, M. E., 2005. A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography*, 20: PA1003. doi: 10.1029/2004PA001071
- Lourens, L. J., Hilgen, F. J., 1997. Long-periodic variations in the Earth's obliquity and their relation to third-order eustatic cycles and Late Neogene glaciations. *Quaternary International*, 40: 43 – 52. doi: 10.1016/S1040-6182(96)00060-2
- Lourens, L. J., Hilgen, F. J., Zachariasse, W. J., et al., 1996. Evaluation of the Plio-Pleistocene astronomical time scale. *Paleoceanography*, 11: 391 – 413. doi: 10.1029/96PA01125
- Lourens, L., Hilgen, F., Shackleton, N. J., et al., 2004. The Neogene period. In: Gradstein, F., Ogg, J., Smith, A., eds., *A geologic time scale 2004*. Cambridge University Press, Cambridge, 409 – 440.
- Lourens, L. J., Sluijs, A., Kroon, D., et al., 2005. Astronomical pacing of Late Paleocene to Early Eocene global warming events. *Nature*, 435: 1083 – 1087. doi: 10.1016/S1040-6182(96)00060-2
- Lu, H., Liu, X., Zhang, F., et al., 1999. Astronomical calibration of loess-paleosol deposits at Luochuan central Chinese loess plateau. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 154: 237 – 246. doi: 10.1016/S0031-0182(99)00113-3
- Lu, H. Y., Hu, T., Wang, X. Y., 2009. Cycles and forcing mechanism of wet-dry variations in North China during the past 11.0 million years revealed by wind-blown silt deposits. *Geological Journal of China Universities*, 15(2): 149 – 158 (in Chinese with English abstract).
- Miall, A. D., Miall, C. E., 2001. Sequence stratigraphy as a scientific enterprise: the evolution and persistence of conflicting paradigms. *Earth-Science Reviews*, 54: 321 – 348. doi: 10.1016/S0012-8252(00)00041-6
- Milankovitch, M., 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem. *Royal Serbian Academy, Belgrade*, 1 – 633.
- Min, K., Mundil, R., Renne, P., et al., 2000. A test for systematic errors in $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ geochronology through comparison with U/Pb analysis of a 1.1 Ga rhyolite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 73 – 98. doi: 10.1016/S0016-7037(99)00204-5
- Mundil, R., Ludwig, K. R., Metcalfe, I., et al., 2004. Age and timing of the Permian mass extinctions: U/Pb dating of closed-system zircons. *Science*, 305: 1760 – 1763. doi: 10.1126/science.1101012
- Mundil, R., Metcalfe, I., Ludwig, K. R., et al., 2001. Timing of the Permian-Triassic biotic crisis: implications from new zircon U/Pb age data (and their limitations). *Earth and Planetary Science Letters*, 187: 131 – 145. doi: 10.1016/S0012-821X(01)00274-6
- Newton, R. J., Pevitt, E. L., Wignall, P. B., et al., 2004. Large shifts in the isotopic composition of seawater sulphate across the Permo-Triassic boundary in northern Italy. *Earth and Planetary Science Letters*, 218: 331 – 345. doi: 10.1016/S0012-821X(03)00676-9
- Olsen, P. E., Kent, D. V., 1999. Long-period Milankovitch cycles from the Late Triassic and Early Jurassic of eastern North America and their implications for the calibration of the Early Mesozoic time-scale and the long-term behaviour of the planets. *Philosophical Transac-*

- tions *Mathematical Physical and Engineering Science*, 357:1761—1786. doi: 10.1098/rsta.1999.0400
- Payne, J. L., Lehrmann, D. J., Wei, J. Y., et al., 2004. Large perturbations of the carbon cycle during recovery from the end-Permian extinction. *Science*, 305:506—509. doi: 10.1126/science.1097023
- Peng, X. F., Feng, Q. L., Li, Z. B., et al., 2008. High-resolution cyclostratigraphy of geochemical records from Permian-Triassic boundary section of Dongpan, southwestern Guangxi, South China. *Science in China (Ser. D)*, 51(2):187—193. doi: 10.1007/s11430-008-0001-z
- Pisias, N. G., Imbrie, J., 1986. Orbital geometry, CO₂, and Pleistocene climate. *Oceanus*, 29(4):43—49.
- Prokoph, A., Villeneuve, M., Agterberg, F. P., 2001. Geochronology and calibration of global Milankovitch cyclicity at the Cenomanian-Turonian boundary. *Geology*, 29(6):523—526. doi: 10.1130/0091-7613(2001)029<0523;GACOGM>2.0.CO;2
- Raffi, I., Backman, J., Fornaciari, E., et al., 2006. A review of calcareous nannofossil astrobiochronology encompassing the past 25 million years. *Quaternary Science Reviews*, 25:3113—3137. doi:10.1016/j.quascirev.2006.07.007
- Rampino, M. R., Prokoph, A., Adler, A., 2000. Tempo of the end-Permian event: high-resolution cyclostratigraphy at the Permian-Triassic boundary. *Geology*, 28(7):643—646. doi: 10.1130/0091-7613(2000)28<643;TOTEHH>2.0.CO;2
- Renne, P. R., Zhang, Z., Richards, M. A., et al., 1995. Synchrony and causal relations between Permian-Triassic boundary crises and Siberian flood volcanism. *Science*, 269:1413—1416. doi: 10.1126/science.269.5229.1413
- Retallack, G. J., Krull, E. S., 2006. Carbon isotopic for terminal-Permian methane outbursts and their role in extinctions of animals, plants, coral reefs, and peat swamps. In: Greb, S. F., DiMichele, W. A., eds., wetlands through time. *Geological Society of America Special Paper*, 399:249—268. doi: 10.1130/2006.2399(12)
- Retallack, G. J., Veevers, J. J., Morante, R., 1996. Global coal gap between Permian-Triassic extinction and Middle Triassic recovery of peat-forming plants. *GSA Bulletin*, 108(2):195—207. doi: 10.1130/0016-7606(1996)108<0195;GCGBPT>2.3.CO;2
- Riall, J. A., 2004. Abrupt climate change: chaos and order at orbital and millennial scales. *Global Planetary Change*, 41:95—109. doi:10.1016/j.gloplacha.2003.10.004
- Sageman, B. B., Meyers, S. R., Arthur, M. A., 2006. Orbital time scale and new C-isotope record for Cenomanian-Turonian boundary stratotype. *Geology*, 34(2):125—128. doi: 10.1130/G22074.1
- Sahney, S., Benton, M. J., 2008. Recovery from the most profound mass extinction of all time. *Proceedings of the Royal Society: Biological Science*, 275:759—765. doi: 10.1098/rspb.2007.1370
- Salvador, A., 1994. *International Stratigraphic Guide—a guide to stratigraphic classification, terminology, and procedure* (2nd edition). International Union Geological Sciences and Geological Society of America.
- Saunders, A., Reichow, M., 2009. The Siberian traps and end-Permian mass extinction; a critical review. *Chinese Science Bulletin*, 54(1):20—37. doi: 10.1007/s11434-008-0543-7
- Schlanger, S. O., Jenkyns, H. C., 1976. Cretaceous oceanic anoxic events; cause and consequence. *Geologie en Mijnbouw*, 55:179—184.
- Schwarzacher, W., 1947. Über die sedimentäre Rhythmik der Dachsteinkalkes von Lofer. *Verh. Geol. Bundesanstalt*, H10—12:175—188.
- Schwarzacher, W., 1975. *Sedimentation models and quantitative stratigraphy*. Elsevier, Amsterdam.
- Schwarzacher, W., 2000. Repetitions and cycles in stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 50:51—75. doi:10.1016/S0012-8252(99)00070-7
- Shackleton, N. J., Opdyke, N. D., 1973. Oxygen isotope and palaeomagnetic stratigraphy of Equatorial Pacific core V28-238; oxygen isotope temperatures and ice volumes on a 10⁵ year and 10⁶ year scale. *Quaternary Research*, 3:39—55. doi:10.1016/0033-5894(73)90052-5
- Shen, S. Z., Henderson, C. M., Bowring, S. A., et al., 2010. High-resolution Lopingian (Late Permian) timescale of South China. *Geological Journal*, 45:122—134. doi: 10.1002/gj.1232
- Skeleton, P. W., Robert, A. S., Simon, P. K., 2003. *The Cretaceous world*. Cambridge University Press.
- Strasser, A., Hilgen, F. J., Heckel, P. H., 2006. Cyclostratigraphy-concepts, definitions, and applications. *Newsletter of Stratigraphy*, 42(2):75—114. doi: 10.1127/0078-0421/2006/0042-0075 0078-00421
- Strasser, A., Hillgärtner, H., Hug, W., et al., 2000. Third-order depositional sequences reflecting Milankovitch cyclicity. *Terra Nova*, 12:303—311. doi: 10.1046/j.1365-3121.2000.00315.x
- Tarduno, J., Brinkman, D. B., Renne, P. R., et al., 1998. Evidence for extreme climatic warmth from Late Cretaceous Arctic vertebrates. *Science*, 282:2241—2244. doi:

- 10.1126/science.282.5397.2241
- Tian, J., Pak, D. K., Wang, P. X., et al., 2006. Late Pliocene monsoon linkage in the tropical South China Sea. *Earth and Planetary Science Letters*, 252: 72—81. doi: 10.1016/j.epsl.2006.09.028
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2004. Pleistocene precession forcing of the upper ocean structure variations in the southern South China Sea. *Progress in Natural Science*, 14 (11): 1004—1009. doi: 10.1080/10020070412331344701
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2005a. Establishment of the Plio-Pleistocene astronomical timescale of ODP Site 1143, southern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 31—39 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., 2005b. Astronomically tuned time scale 12 Ma to 18.3 Ma, ODP Site 1148, northern South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(5): 513—518 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2002. Astronomically tuned Plio-Pleistocene benthic $\delta^{18}\text{O}$ record from South China Sea and Atlantic-Pacific comparison. *Earth and Planetary Science Letters*, 203: 1015—1029. doi: 10.1016/S0012-821X(02)00923-8
- Tian, J., Wang, P. X., Cheng, X. R., et al., 2005c. Forcing mechanism of the Pleistocene East Asian monsoon variations in a phase perspective. *Science in China (Ser. D)*, 48(10): 1708—1717. doi: 10.1360/01yd0467
- Tian, J., Zhao, Q., Wang, P. X., et al., 2008. Astronomically modulated Neogene sediment records from the South China Sea. *Paleoceanography*, 23: PA3210. doi: 10.1029/2007PA001552
- Tong, J. N., Wang, D. H., 2005. Triassic chronostratigraphy and biotic recovery. *Advances in Earth Science*, 20(12): 1321—1326 (in Chinese with English abstract).
- Tong, J. N., Yin, H. F., 1999. A Study on the Griesbachian cyclostratigraphy of Meishan Section, Changxing, Zhejiang Province. *Journal of Stratigraphy*, 23: 130—135 (in Chinese with English abstract).
- Tong, J. N., Yin, H. F., 2009. Advance in the study of Early Triassic life and environment. *Acta Palaeontologica Sinica*, 48(3): 497—508 (in Chinese with English abstract).
- Torrence, C., Compo, G. P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79: 61—78.
- Turco, E., Hilgen, F. J., Lourens, L. J., et al., 2001. Punctuated evolution of global climate cooling during the late Middle to Late Miocene; high-resolution planktonic foraminiferal and oxygen isotope records from the Mediterranean. *Paleoceanography*, 16: 405—423. doi: 10.1029/2000PA000509
- Twitchett, R. J., Krystyn, L., Baud, A., et al., 2004. Rapid marine recovery after the end-Permian mass-extinction event in the absence of marine anoxia. *Geology*, 32: 805—808. doi: 10.1130/G20585.1
- Van Dam, J. A., Abdul Aziz, H., de los Angeles Alvarez Sierra, M., et al., 2006. Long-period astronomical forcing of mammal turnover. *Nature*, 443: 687—691.
- Van Vugt, N., Steenbrink, J., Langereis, C. G., et al., 1998. Magnetostratigraphy-based astronomical tuning of the Early Pliocene lacustrine sediments of Ptolemais (NW Greece) and bed-to-bed correlation to the marine record. *Earth and Planetary Science Letters*, 164: 535—551. doi: 10.1016/S0012-821X(98)00236-2
- Varadi, F., Runnegar, B., Ghil, M., 2003. Successive refinements in long-term integrations of planetary orbits. *Astrophysical Journal*, 592: 620—630.
- Wade, B. S., Pálke, H., 2004. Oligocene climate dynamics. *Paleoceanography*, 19: A4019. doi: 10.1029/2004PA001042
- Wang, C. S., 2006. Coupling of the Earth surface system; inferring from the Cretaceous major geological events. *Advances in Earth Science*, 21: 838—842 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Feng, Z. Q., Wu, H. Y., et al., 2008. Preliminary achievement of the Chinese Cretaceous continental scientific drilling project-SK-I. *Acta Geologica Sinica*, 82(1): 9—19 (in Chinese with English abstract).
- Wang, C. S., Hu, X. M., Sarti, M., et al., 2005. Upper Cretaceous oceanic red beds in southern Tibet: a major change from anoxic to oxic, deep-sea environments. *Cretaceous Research*, 26: 21—32. doi: 10.1016/j.cretres.2004.11.010
- Wang, C. S., Huang, Y. J., Zhao, X. X., 2009. Unlocking a Cretaceous geologic and geophysical puzzle: scientific drilling of Songliao basin in Northeast China. *The Leading Edge*, 28: 340—344. doi: 10.1190/1.3104081
- Wang, G. D., Cheng, R. H., Wang, P. J., et al., 2009. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the Quantou Formation recovered by CCSD-SK-Is borehole in Songliao basin; lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 324—338 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. J., Gao, Y. F., Cheng, R. H., et al., 2009. Description of Cretaceous sedimentary sequence of the second

- and third member of the Qingshankou Formation recovered by CCSD-SK2-Is borehole in Songliao basin; lithostratigraphy, sedimentary facies and cyclic stratigraphy. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 288—313 (in Chinese with English abstract).
- Wang, P. X., 2006. Astronomical “pendulum” for geological clock. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 26(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X. D., Sugiyama, T., 2000. Diversity and extinction patterns of Permian coral faunas of China. *Lethaia*, 33: 285—294. doi: 10.1080/002411600750053853
- Weedon, G., 2003. Time-series analysis and cyclostratigraphy. Cambridge University Press, Cambridge.
- Westerhold, T., Röhl, U., Raffi, I., et al., 2008. Astronomical calibration of the Paleocene time. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 257: 377—403. doi: 10.1016/j.palaeo.2007.09.016
- Westphal, H., Hilgen, F., Munneke, A., 2010. An assessment of the suitability of individual rhythmic carbonate successions for astrochronological application. *Earth Science Reviews*, 99: 19—30. doi: 10.1016/j.earscirev.2010.02.001
- Wignall, P. B., Sun, Y. D., Bond, D. P. G., et al., 2009. Volcanism, mass extinction, and carbon isotope fluctuations in the Middle Permian of China. *Science*, 324: 1179—1182. doi: 10.1126/science.1171956
- Wignall, P. B., Twitchett, R. J., 2002. Permian-Triassic sedimentology of Jameson Land, East Greenland: incised submarine channels in an anoxic basin. *Journal of the Geological Society*, 159(6): 691—703. doi: 10.1144/0016-764900-120
- Wilson, D. S., 1993. Confirmation of the astronomical calibration of the magnetic polarity timescale from sea-floor spreading rates. *Nature*, 364: 788—790. doi: 10.1038/364788a0
- Wilson, P. A., Norris, R. D., Cooper, M. J., 2002. Testing the mid-Cretaceous greenhouse hypothesis using “glassy” foraminiferal calcite from the core of the Turoonian tropics on Demerara Rise. *Geology*, 30: 607—610. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0607:TTCGHU>2.0.CO;2
- Wu, H. C., Zhang, S. H., Jiang, G. Q., et al., 2009. The floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation from the Songliao basin of Northeast China and its stratigraphic and paleoclimate implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 278: 308—323. doi: 10.1016/j.epsl.2008.12.016
- Wu, H. C., Zhang, S. H., Huang, Q. H., 2008. Establishment of floating astronomical time scale for the terrestrial Late Cretaceous Qingshankou Formation in the Songliao basin of Northeast China. *Earth Science Frontiers*, 15(4): 159—169 (in Chinese with English abstract).
- Wu, H. C., Zhang, S. H., Sui, S. W., et al., 2007. Recognition of Milankovitch cycles in the natural gamma-ray logging of Upper Cretaceous terrestrial strata in the Songliao basin. *Acta Geologica Sinica*, 81(6): 996—1001.
- Xu, D. Y., 2005. Astro-geologic time scale and the advancements of cyclostratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 29 (Suppl.): 635—640 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. Y., Han, Y. B., Li, G. H., et al., 2006. The rise of astrostratigraphy. *Journal of Stratigraphy*, 30(4): 323—326 (in Chinese with English abstract).
- Xu, D. Y., Yao, Y. M., Han, Y. B., et al., 2008. Astrostratigraphic research on the Neogene Minghuazhen Formation in Dongying sag, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 10(6): 287—296 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W., Lehrmann, D. J., 2003. Milankovitch climatic signals in Lower Triassic (Olenekian) peritidal carbonate successions, Nanpanjiang basin, South China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 201: 283—306. doi: 10.1016/S0031-0182(03)00614-X
- Yao, Y. M., Fu, G. B., Xu, D. Y., et al., 2003. Preliminary study on the high-resolution cyclostratigraphy of the Jurassic system in Turpan-Hami basin, Xinjiang. *Journal of Stratigraphy*, 27(2): 122—128 (in Chinese with English abstract).
- Yao, Y. M., Xu, D. Y., Li, B. L., et al., 2007. High resolution cyclostratigraphic study on the third member of Shahejie Formation of drill core niu38 in the Dongying depression, Shandong Province. *Journal of Stratigraphy*, 31(3): 229—239 (in Chinese with English abstract).
- Yin, H. F., Feng, Q. L., Lai, X. L., et al., 2007. The protracted Permo-Triassic crisis and multi-episode extinction around the Permian-Triassic boundary. *Global and Planetary Change*, 55: 1—20. doi: 10.1016/j.gloplacha.2006.06.005
- Yin, H. F., Zhang, K. X., Tong, J. N., et al., 2001. The global stratotype section and point (GSSP) of the Permian-Triassic boundary. *Episodes*, 24: 102—114.
- Zachos, J. C., Shackleton, N. J., Revenaugh, J. S., et al., 2001. Climate response to orbital forcing across the Oligocene-Miocene boundary. *Science*, 292: 274—278. doi: 10.1126/science.1058288
- Zhang, X. H., Zhao, Z. Y., 2002. Definition of Milankovitch

cycles for Yangchang Formation of the Upper Triassic in Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 23(4): 372–375 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈代钊, 2000. 旋回地层学——一个正在发展中的理论. 第四纪研究, 20(2): 186–195.
- 陈建业, 冯庆来, 陈晶, 等, 2007. 广西东攀二叠系—三叠系界线剖面基于岩石磁参数的米兰科维奇旋回特征和地层对比. 地层学杂志, 31(4): 309–316.
- 程日辉, 王国栋, 王璞珺, 2008. 松辽盆地白垩系泉三段—嫩二段沉积旋回与米兰科维奇周期. 地质学报, 28(1): 55–64.
- 程日辉, 王国栋, 王璞珺, 等, 2009. 松科 1 井南孔白垩系姚家组沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层. 地学前缘, 16(2): 272–287.
- 高有峰, 王璞珺, 程日辉, 等, 2009. 松科 1 井南孔白垩系青山口组一段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层. 地学前缘, 16(2): 314–323.
- 龚一鸣, 杜远生, 童金南, 等, 2008. 旋回地层学: 地层学解读时间的第三里程碑. 地球科学——中国地质大学学报, 33(4): 443–457.
- 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.
- 郭刚, 童金南, 张世红, 等, 2007. 安徽巢湖早三叠世印度期旋回地层研究. 中国科学(D辑), 37(12): 1571–1578.
- 李前裕, Lourens, L., 汪品先, 2007. 新近纪海相生物地层事件年龄新编. 地层学杂志, 31(3): 197–208.
- 李前裕, 汪品先, 2005. 认识偏心率周期的地层古气候意义. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5): 519–528.
- 鹿化煜, 胡挺, 王先彦, 2009. 1 100 万年以来中国北方风尘堆积与古气候变化的周期及驱动因素分析. 高校地质学报, 15(2): 149–158.
- 彭兴芳, 冯庆来, 李周波, 等, 2007. 广西东攀二叠系—三叠系界线剖面地球化学旋回研究. 中国科学(D辑), 37(12): 1565–1570.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 2004. 更新世南海南部上层海水结构变化的岁差驱动. 自然科学进展, 14(6): 683–688.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005a. 南海 ODP1143 站上新世至更新世天文年代标尺的建立. 地球科学——中国地质大学学报, 30(1): 31–39.

- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005b. 南海 ODP1148 站中新世(12~18.3 Ma)天文调谐的年代标尺. 地球科学——中国地质大学学报, 30(5): 513–518.
- 田军, 汪品先, 成鑫荣, 等, 2005c. 从相位差探讨更新世东亚季风的驱动机制. 中国科学(D辑), 35(2): 158–166.
- 童金南, 王德琛, 2005. 三叠纪年代地层与生物复苏. 地球科学进展, 20(12): 1321–1326.
- 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: 130–135.
- 童金南, 殷鸿福, 2009. 早三叠世生物与环境研究进展. 古生物学报, 48(3): 497–508.
- 汪品先, 2006. 地质计时的天文“钟摆”. 海洋地质与第四纪地质, 26(1): 1–7.
- 王成善, 2006. 白垩纪地球表层系统重大地质事件与温室气候变化研究——从重大地质事件探寻地球表层系统耦合. 地球科学进展, 21: 838–842.
- 王成善, 冯志强, 吴河勇, 等, 2008. 中国白垩纪大陆科学钻探工程: 松科一井科学钻探工程的实施与初步进展. 地质学报, 82(1): 9–19.
- 王国栋, 程日辉, 王璞珺, 等, 2009. 松科 1 井南孔白垩系泉头组沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层. 地学前缘, 16(2): 324–338.
- 王璞珺, 高有峰, 程日辉, 等, 2009. 松科 1 井南孔白垩系青山口组二、三段沉积序列精细描述: 岩石地层、沉积相与旋回地层. 地学前缘, 16(2): 288–313.
- 吴怀春, 张世红, 黄清华, 2008. 中国东北松辽盆地晚白垩世青山口组浮动天文年代标尺的建立. 地学前缘, 15(4): 159–169.
- 徐道一, 2005. 天文地质年代代表与旋回地层学研究进展. 地层学杂志, 29(增刊): 635–640.
- 徐道一, 姚益民, 韩延本, 等, 2008. 山东东营凹陷新近系明化镇组天文地层研究. 古地理学报, 10(6): 287–296.
- 徐道一, 韩延本, 李国辉, 等, 2006. 天文地层学的兴起. 地层学杂志, 30(4): 323–326.
- 姚益民, 付国斌, 徐道一, 等, 2003. 新疆吐哈盆地侏罗系旋回地层的初步研究. 地层学杂志, 27(2): 122–128.
- 姚益民, 徐道一, 李保利, 等, 2007. 东营凹陷牛 38 井沙三段高分辨率旋回地层研究. 地层学杂志, 31(3): 229–239.
- 张小会, 赵重远, 2002. 鄂尔多斯盆地上三叠统延长组米兰科维奇旋回的确定. 石油与天然气地质, 23(4): 372–375.