



地学前缘
Earth Science Frontiers
ISSN 1005-2321,CN 11-3370/P

《地学前缘》网络首发论文

题目: 沉积盆地波动过程分析:研究现状与展望
作者: 金之钧, 陈书平, 张瑞
DOI: 10.13745/j.esf.sf.2024.1.30
收稿日期: 2024-01-30
网络首发日期: 2024-02-07
引用格式: 金之钧, 陈书平, 张瑞. 沉积盆地波动过程分析:研究现状与展望[J/OL]. 地学前缘. <https://doi.org/10.13745/j.esf.sf.2024.1.30>



网络首发: 在编辑部工作流程中,稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定,且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件,可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定;学术研究成果具有创新性、科学性和先进性,符合编辑部对刊文的录用要求,不存在学术不端行为及其他侵权行为;稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准,正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性,录用定稿一经发布,不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容,只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约,在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版,以单篇或整期出版形式,在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z),所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2024.1.30

沉积盆地波动过程分析：研究现状与展望

金之钧^{1,2,3}, 陈书平⁴, 张 瑞^{1,2,3}

1. 北京大学 能源研究院, 北京 100871
2. 北京大学 地球与空间科学学院 造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871
3. 页岩油气富集机理与高效开发全国重点实验室, 北京 102206
4. 中国石油大学(北京) 地球科学学院 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

JIN Zhijun^{1,2,3}, CHEN Shuping⁴, ZHANG Rui^{1,2,3}

1. *Institute of Energy, Peking University, Beijing 100871, China*
2. *Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, Ministry of Education, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China*
3. *State Key Laboratory of Shale Oil and Gas Enrichment Mechanisms and Effective Development, Beijing 102206, China*
4. *State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

JIN Zhijun, CHEN Shuping, ZHANG Rui. Fluctuational process analysis of sedimentary basins: Review and outlook. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(1)

Abstract: Fluctuation of sedimentary basins is the primary manifestation of crustal movement within the plates. The formation and evolution of basins result from the superposition of various fluctuation processes within the Earth system. Fluctuation process analysis of basins involves the decomposition of periodic fluctuation curves from sedimentation rate time series, leading to a new understanding of basin evolutionary history. This includes the identification of fluctuation cycles controlling basin evolution and hydrocarbon accumulation episodes; the relationship between basin crustal uplift/subsidence and hydrocarbon generation as well as thermal evolution; the spatial-temporal distribution of unconformities and erosion recovery; the spatial-temporal distribution of stratigraphic framework and configuration of source-reservoir-cap strata controlled by the superposition of multi-scale fluctuation processes; and the relationship between tectonic evolution patterns and hydrocarbon reservoir preservation. The analysis of fluctuation processes in sedimentary basins integrates the study of basin formation, hydrocarbon generation and accumulation with crustal fluctuation processes, enabling the quantitative description of the dynamic evolution process of hydrocarbon accumulation and providing guidance for oil and gas exploration practices. Future research on basin fluctuation processes should focus on the mechanism of basin fluctuation driven by long-term astronomical periods and deep Earth dynamic cycles; integrate geological evidence with numerical simulation techniques; advance the analysis methods of basin fluctuation processes; promote the transformation of basin fluctuation theory results to comprehensively understand the multi-spherical interactions and environmental impacts of resources. Leveraging the predictive function of basin fluctuation analysis to understand the patterns of hydrocarbon accumulation can provide a scientific basis for the exploration and long-lasting evaluation of oil and gas resources.

Keywords: multi-spherical interactions; crustal fluctuations; geodynamics; astronomical cycles; hydrocarbon accumulation; source rocks

收稿日期: 2024-01-30; 修回日期: 2024-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(42090020, 42090025, 42172138, 42102166)

作者简介: 金之钧(1957—), 男, 博士, 中国科学院院士, 主要从事石油地质理论和能源发展战略研究。E-mail: jinzhj1957@pku.edu.cn

摘要:沉积盆地的波状运动是板块内部地壳运动的主要表现形式,沉积盆地的形成演化是地球系统中各种波动过程相互叠加的结果。盆地波动过程分析从沉积速率时间序列中分解出有周期规律的波动曲线,获得盆地演化历史的新认识。主要包括控制盆地演化的波动周期与成藏旋回,盆地地壳升降运动与油气生成及热演化的关系,不整合面的时空分布与剥蚀量恢复,多尺度波动叠加控制下的地层格架时空分布与生储盖层配置关系,隆拗变迁规律与油气藏保存的关系等。盆地波动过程分析技术将成盆、成烃和成藏的研究思路与地壳的波动过程有机融合,可以定量描述油气成藏动态演化过程,对油气勘探实践具有指导作用。沉积盆地波动过程研究未来应着重开展超长天文周期与地球深部动力学旋回驱动的盆地波动机制研究,加强地质证据与数值模拟技术融合,完善盆地波动过程分析方法,推进盆地波动理论成果转化以全面理解圈层相互作用与资源环境效应。充分发挥盆地波动分析技术对油气藏分布规律的预测功能,为油气资源远景评价与勘探提供科学依据。

关键词:圈层相互作用;地壳波状运动;地球动力学;天文周期;油气成藏;烃源岩

中图分类号:P541;TE122 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2024)01-0000-00

0 引言

波动是物质运动的基本形式,它表现出时间上的周期性或旋回性,以及空间上的波状传播特征^[1-3]。波动是地球系统各个圈层运动的基本形式之一,也是行星地球演化过程中的一个基本规律^[4-6]。沉积盆地作为地壳的一部分,其波动演化过程是地壳波状运动的组成部分^[7],其产生机制既有天文周期驱动^[8-9],也有地球动力学旋回作用^[10-11]。

地壳波状运动的概念是在20世纪30年代由范·贝梅伦提出的^[12],他认为地球内部的物质分异和对流是波动的起因。20世纪中期,葛立普(Grabau)、别洛乌索夫(Belousov)、哈因(B. E. Хаин)等地质学家从不同角度论述了地壳运动的波动性,使得地壳波动理论成为大地构造的核心理论之一^[2,13]。20世纪70年代,我国学者张伯声创立了“地壳波浪状镶嵌构造”学说,提出地壳的基本构造运动是波浪运动,以此来解释地球在演化阶段上的等时性问题^[14]。20世纪80年代初期,张一伟创造性地将波动概念引入到盆地分析中,提出波状运动是板块内部地壳运动的一种主要形式,应用两组波动相互叠加的方法分析渤海湾盆地的演化和油气富集规律^[15],是国内盆地波动研究的先驱。20世纪80年代后期,苏联学者施比伊曼和缅斯尼科娃共同创立了以波动理论为基础的盆地波动过程分析方法,应用于油气资源的定量预测。20世纪90年代,金之钧将盆地波动定量分析方法引进国内,并在随后研究中逐渐完善形成了盆地波动分析的定量化研究方法^[1,16-17],并将其应用到含油气盆地分析中,有效弥补了板块构造学说解决陆内变形问题的不足之处。

当今石油地质学的发展已进入地球圈层相互作用与资源环境演化过程整合的时代,建立地球系统演化与油气资源形成之间的内在关系,揭示全球不同地质环境中的油气富集规律,是当前面临的关键科学问题。这需从行星地球乃至银河系的角度俯瞰沉积盆地的演化,关注宇宙因素和地球整体行为对沉积盆地波动演化的控制及其资源环境效应^[5,9,11]。地壳波动学术思想开启了一个全新的视角,盆地波动过程分析则是我们认识油气成藏地质条件和活动规律的一把金钥匙。近年来,中国学者对不同时代、不同性质的沉积盆地波动过程及其控油规律开展了研究,将成盆、成烃、成藏的研究思路贯穿于地壳波动这条主线,创新发展了叠合盆地油气成藏理论^[3,18-19]。

本文旨在:(1)概述盆地波动过程分析的基本内涵和主要研究内容;(2)总结盆地波动过程对油气形成与富集的控制作用;(3)展望盆地波动研究的未来发展方向,提供圈层相互作用与油气成藏综合研究的新视角。

1 盆地波动过程分析的基本内涵

波动过程是指地质质点及其运动状态在时间和空间中有规律地转移、扩散的过程^[1,20]。沉积盆地波动过程是地壳波状运动最直接的表现,一个完整的波动过程包括了盆地从沉降沉积到隆升剥蚀的完整周期^[21]。若将地质体当作线性介质,一个最简单的线性波动过程 u 可以用如下公式表达:

$$u = A \cdot \sin \left[\frac{2\pi}{T} (t - t_0) \right]$$

式中: A 为振幅, T 为周期, t 为时间, t_0 为初始相

位点。

在物理学中,当几列波在同一介质中相遇时,它们保持各自的特征。而在波的叠加区域,任一点的位移是各个波在该点产生位移的合成,这种传播规律被称为波的叠加原理^[22]。两组波的能量叠加后对同一个质点形成振幅调制效应。波峰与波峰或波谷与波谷的叠加会使得它们的振幅变大;而波峰和波谷叠加则会相互抵消,使振幅变小或者消失。同时,高频周期的振幅会受到更低频周期的控制^[9-10,23]。换言之,长时间尺度的波动过程对短时间尺度的波动过程起到重要的控制作用。

多尺度波动的叠加效应增加了对地质现象解读的复杂性。而盆地波动分析的任务即是利用地质、数学、物理等方法,分解出盆地演化的主控周期,建立波动方程,并用简明的数学语言描述复杂的地质现象^[1]。以“滑动窗”地质滤波法为例^[16-17],其基本步骤是优选研究剖面,在地层精细定年基础上,将地层深度剖面转换为时间剖面,以获得沉积速率(严格来讲应当用沉降速率,一般情况下可用沉积速率代替;当沉积沉降不均衡时,则需要校正)。通过调整滑动窗口的大小来对沉积速率曲线进行滤波,连续滤波可以得到具有稳定周期的波动曲线(图1)。

波动分析法的一个突出特点是其预测性。通过确定波动方程,可以预测在长期的地质过程中可能发生的各种地质作用,使得我们对地壳运动特点和

油气聚集成藏规律的认识有了一种定量研究的工具。

2 盆地波动过程分析的主要内容

盆地波动过程分析主要涉及如下4个层面的研究。

(1)研究盆地波动的成因机制。主要从地球系统观出发,涉及地壳波状运动和成盆动力学研究,考虑天文因素和地球动力学因素对沉积盆地演化的叠加调控,探索盆地波动的成因机制。

(2)探索波动要素分离方法。综合利用野外露头、岩心、地层古生物、钻井、录井、测井和地震资料,建立地层年代格架,恢复地层的原始厚度,进而计算出不同时期的沉积速率,借助时间序列分析方法提取不同尺度的周期波曲线,建立波动方程。在这个过程中,最关键的是地质定年方法和波动要素分离方法的研究。

(3)揭示盆地波动过程中的基础地质规律。涉及不同时间尺度的波动过程和空间尺度的波动平面迁移及机制。主要包括分析控制盆地演化的主要波动周期,划分沉积旋回与构造旋回,分析平面波动过程与隆拗变迁规律、盆地地壳升降运动规律,解释目前地层格架的时空分布、成因和形成过程等。

(4)结合成藏因素与成藏作用分析,探索盆地波动过程对油气形成与富集的控制。主要根据波动的叠加原理,认识生油层、储集层和盖层的发育机制、配置关系与平面分布规律,进而预测它们的空间展布特征。利用波动分析提供的埋藏史曲线,更准确地恢复不整合剥蚀量,分析烃源岩热演化史,划分有利生烃相带;揭示油气藏的形成及破坏过程,划分成藏旋回。最终结合盆地的油气成藏研究成果,指出有利远景区。以上研究内容的实现路径如图2所示。

3 盆地波动过程分析结果及意义

3.1 盆地演化的主要波动周期与成藏旋回

3.1.1 主要波动周期

统计表明,全球沉积盆地的演化主要呈现约740 Ma、220 Ma、90 Ma、30 Ma和约10 Ma等长周期波动^[9](表1)。这些主控周期反映了盆地构造旋回、层序格架、沉积充填、生物演化等过程的变化^[4,19,24]。

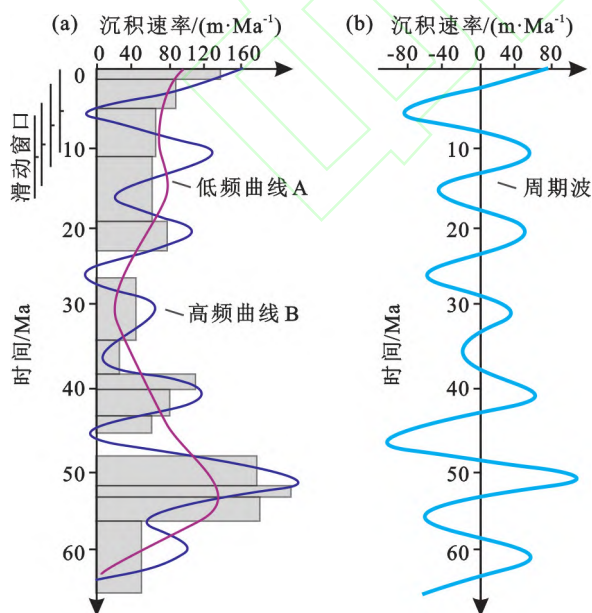


图1 “滑动窗”法地质滤波示意图

Fig.1 Geological filtering diagram using the “sliding window” method

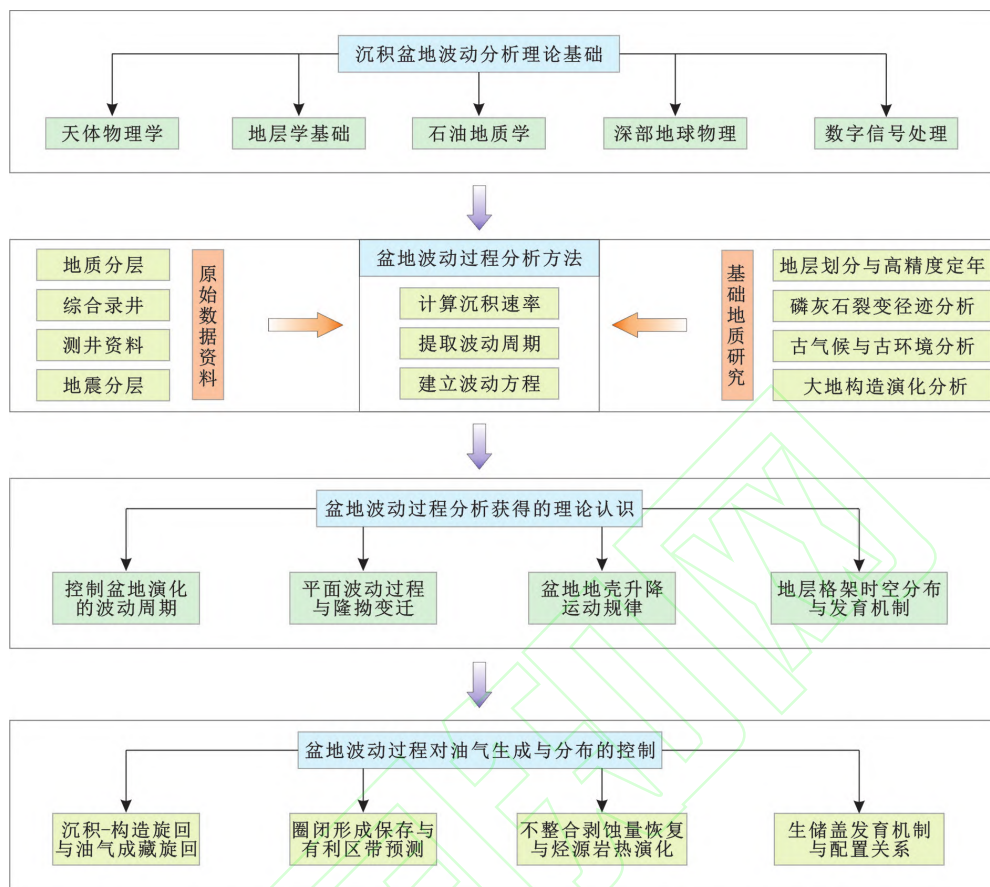


图2 盆地波动过程分析的主要内容与技术思路

Fig. 2 Principal content and technical approach for analyzing the fluctuational process of sedimentary basins

表1 全球典型沉积盆地波动演化主控周期

Table 1 Dominant periods controlling the fluctuational evolution in globally representative sedimentary basins

沉积盆地	地质时代	沉积旋回/Ma					文献来源
渤海湾盆地	新元古代至今	740	200~220	—	27~35	6~10	[16]
塔里木盆地	新元古代至今	740~760	200~235	100	30	10	[3,19]
四川盆地	新元古代至今	750	220	100	35	18	[29]
三水盆地	新元古代至今	740	220	120	30	10	[28]
楚雄盆地	新元古代至今	760	220	100	45	10	[40]
柴达木盆地	显生宙	—	180	—	20	8	[41]
鄂尔多斯盆地	显生宙	—	250	93	33	9	[37]
松辽盆地	中生代	—	—	100	35	8	[42]
燕辽裂谷	中元古代	—	200	—	32	—	[43]
西西伯利亚盆地	新元古代至今	540	200	—	27~35	—	[1]
西西伯利亚盆地	中—新生代	—	180~200	90	45	18	[31]
加拿大北极地区	显生宙	—	—	—	32	—	[44]
日本美浓盆地	中生代	—	—	—	30	10	[45]
意大利西西里岛	中生代	—	—	—	30	10	[8]
美国纽瓦克盆地	中生代	—	—	—	—	8~10	[8]
巴西亚马逊河口盆地	白垩纪	—	—	—	—	9.5	[24]
意大利古比奥地区	白垩纪	—	—	—	—	8	[46]

(1) 沉积盆地约 740 Ma 波动通常称为“能量函数”,代表盆地的生命周期,对其他波动过程都起到调制作用^[25]。超大陆的聚合-裂解周期约 700 Ma^[26-27],这意味,沉积盆地的生命周期可能与超大陆演化之间存在某种潜在联系。

(2) 沉积盆地约 220 Ma 波动过程反映盆地内隆起与拗陷的形成以及盆地尺度不整合发育^[28-29]。该尺度的波动过程与威尔逊旋回^[26-27,30]基本一致,受地球板块运动体制的控制作用显著。

(3) 沉积盆地约 90 Ma 波动过程反映区域构造旋回和盆地内部不整合发育^[31-33]。该尺度的波动可能源自地幔对流对岩石圈施加垂向应力的影响^[34-36]。

(4) 沉积盆地约 30 Ma 波动过程可能指示盆地基底的垂直振荡和层序发育^[2,28]。例如,鄂尔多斯盆地中生界发生多幕次的隆升-剥蚀事件,具有显著的约 30 Ma 波动周期,揭示了盆地垂直升降运动与沉积旋回的密切联系^[37]。

(5) 沉积盆地约 10 Ma 以及高频波动过程代表盆地局部的沉积充填和岩性、物性变化,通常与局部构造因素(如物源区、盆地地貌、流域特征、沉积负载和构造负载)相关^[9,38-39]。

总之,沉积盆地的生成与消亡,沉积与剥蚀乃至岩性的旋回变化都受着上述各种周期运动的共同控制。

3.1.2 油气成藏旋回

沉积盆地演化的多旋回特征控制着盆地发育多套生、储、盖组合及多期成藏。所谓成藏旋回指的是在盆地从沉降到隆升的一个完整波动过程中,油气从烃源岩排出、运移到聚集成藏的全过程^[25,47]。根据我国典型叠合盆地的演化过程和油气成藏特点,一个完整的成藏旋回历时约 200 Ma^[19,25,47-48]。

塔里木盆地隆起与拗陷的迁移导致构造圈闭呈波浪式摆动,具有约 200 Ma 周期,依次波及塔中凸起、塔北隆起、巴楚凸起、库车拗陷(图 3)^[19]。这对油气的生成、运移、聚集和保存产生了深远影响。在地质历史时期,塔里木盆地约 200 Ma 周期波动过程中依次形成了 3 期成藏旋回,分别为成藏旋回 I (寒武纪—中泥盆世末)、成藏旋回 II (晚泥盆世—侏罗纪末)、成藏旋回 III (白垩纪—第四纪)^[25,47]。其中,寒武纪—中泥盆世末成藏旋回期间形成的油气藏往往表现为油气从形成到破坏的完整过程。晚泥盆世—侏罗纪末成藏旋回期间,塔里木盆地演化处

于关键构造转折期,沉积速率在三叠纪达到高峰,出现了油气运移的峰值,油气藏的演化以油气形成—调整(破坏)—定型为主要特点。白垩纪—第四纪成藏旋回尚不完整,“不完整”并不是以油气藏的破坏作为终结,换言之,该期形成的油气藏一般都能比较好地保存下来。

我国其他的多旋回叠合盆地的油气成藏也表现出旋回性特点。如柴达木盆地自震旦纪以来共经历了 4 个约 180 Ma 周期演化过程^[41],其中后 3 个周期演化过程相应控制着 3 个成藏旋回,即寒武纪—中泥盆世成藏旋回、晚泥盆世—三叠纪成藏旋回和侏罗纪—新生生成藏旋回。

3.2 盆地地壳升降运动与油气生成及热演化的关系

盆地地壳的升降运动表现为隆起或拗陷的周期性转变,决定着盆地沉积埋藏史、生储盖层配置、烃源岩热演化、圈闭保存条件等油气成藏要素,使油气成藏具有旋回性发展的特点。

3.2.1 基底沉降波动过程

沉积盆地是地壳的沉降构造单元。在地球的历史上,许多克拉通盆地都经历了近周期性的大规模隆升和沉降事件^[7,35-36]。多旋回叠合盆地的发展过程决定了盆地的埋藏史和沉降史具有显著波动特征^[18]。基底沉降过程、海平面升降变化、古水深变化和各时期沉积层总厚度之间存在一定的函数关系。通过单井沉降波动分析,可以得到各地层的原始沉积厚度,分离出波动沉降的主周期和目标层的沉降过程,从而编制埋藏史图^[2,49]。

近年来对塔里木盆地沉积地层开展了波动过程及其控油规律研究,在时间维度揭示了盆地沉积演化多尺度波动周期及控藏作用。例如,塔里木盆地中央构造带的巴楚凸起的基底沉降波动过程可以分离出 4 个不同尺度的波动过程(图 4)^[2],周期分别为 740~760、220~230、100~110 和 29~31 Ma。740~760 Ma 的曲线代表塔里木盆地总体沉降水平,对其他波动过程起到调制作用。其中,220~230 Ma 周期控制沉积盆地从生成到消亡的全过程,最后一个周期(早白垩世—第四纪)还未结束。100~110 Ma 周期与盆地演化阶段有较好的对应关系。29~31 Ma 周期曲线反映了巴楚地区沉积旋回发育过程与不整合发育。

3.2.2 不整合发育与剥蚀量恢复

不整合面记录了地壳的振荡过程,蕴含着丰富

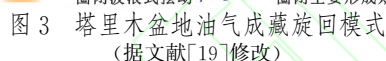


Fig. 3 The model of hydrocarbon accumulation cycle in the Tarim Basin. Modified after [19].

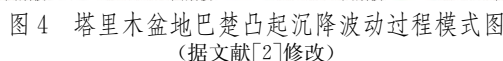


Fig. 4 Process of fluctuating subsidence in the Bachu uplift within the Tarim Basin. Modified after [2].

的地质信息^[50]。传统的地质方法可以计算最终的剥蚀量,但对于剥蚀过程却无法回答。盆地波动分析定量化方法的提出,能够恢复不整合的形成过程,即何时发生过沉积、沉积了多少,何时又发生过剥蚀、剥蚀了多少^[21,51-53]。结合磷灰石裂变径迹分析等低温热年代学技术,可以校正通过波动方程计算得出的剥蚀量。根据沉积-剥蚀波动方程,最终能够建立沉积埋藏史与基底沉降波动过程的精细模型。这对于分析原型盆地范围、划分层序地层、研究烃源岩热演化(如二次生烃过程)具有重要意义。

3.2.3 烃源岩热演化史

地质历史时期全球温室气候与冰室气候的交替,使得盆地表层温度发生波动^[54-55];盆地深部地质过程的波动性,使得大地热流的演化也是波动的^[56-57]。地层沉积与剥蚀的波动过程对烃源岩的热演化及油气的运移聚集过程也有明显的控制作用。沉积有机质随着埋藏深度的增大,温度和压力都会增加,有机质会进入生油气阶段。如果在此过程中,盆地经历了抬升作用,就会阻断烃源岩生烃过程。再次埋藏时,又可进入生烃门限。因此,地层沉积与剥蚀的波动过程可以促进或抑制烃源岩的热演化。另外,盆地波动过程中深部流体携带大量热能可以通过有机-无机相互作用间接影响烃源岩生烃过程^[58]。

以柴达木盆地新生界为例,柴达木盆地在古近

纪期间沉积了下干柴沟组上段(E_3^2)优质烃源岩段^[41]。由于下干柴沟组上段具有较大的沉积速率与埋藏速率,该段烃源岩层具有初期生烃早的特点,缩短了烃源岩进入成熟窗的时间(图5)^[41]。狮子沟组沉积期后,盆地西部快速抬升,缩短了生油时间,有利于先期生成的溶解气的脱气作用。

3.3 地层格架时空分布与生储盖配置

多尺度波动过程的叠加通过控制沉积速率变化,影响岩性旋回发育,间接影响源储配置、源盖配置以及油气富集^[59]。

在单个谐波的传播过程中,波谷位置沉积速率相对较低,易发育泥页岩等细粒沉积物,形成烃源岩层;波峰位置沉积速率相对较高,易发育砂岩等粗粒沉积物形成储集层^[40,60]。而生储盖的发育及配置关系是复杂的,它是不同级次的周期波相位变化和振幅调制的综合产物。烃源岩层通常发育在不同尺度波动曲线的波峰与波谷的叠加位置(图6A)^[40,60],因为不同尺度的波动过程在此位置具有一定的沉积加速度,但沉积加速度方向恰好相反。它们的相互作用使得水体环境抵消部分能量,形成低沉积速率、低水体能量的沉积环境,有利于有机质的富集与保存。储集层通常发育在不同尺度波动曲线的波峰与波峰的叠加位置(图6B)^[40,60]。虽然沉积加速度小,但沉积速率达到峰值,高能水体环境有利于碎屑物质搬运和沉积。盖层是区域性的广

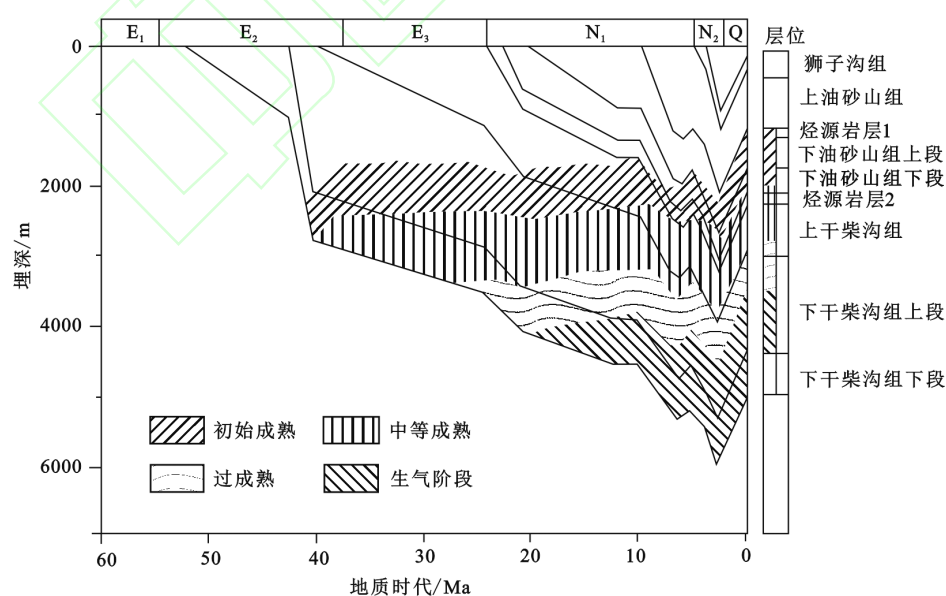


图5 柴达木盆地西部地区风2井埋藏史曲线
(据文献^[41])

Fig. 5 Burial history curve of the Feng 2 well in the western Qaidam Basin. Adapted from ^[41].

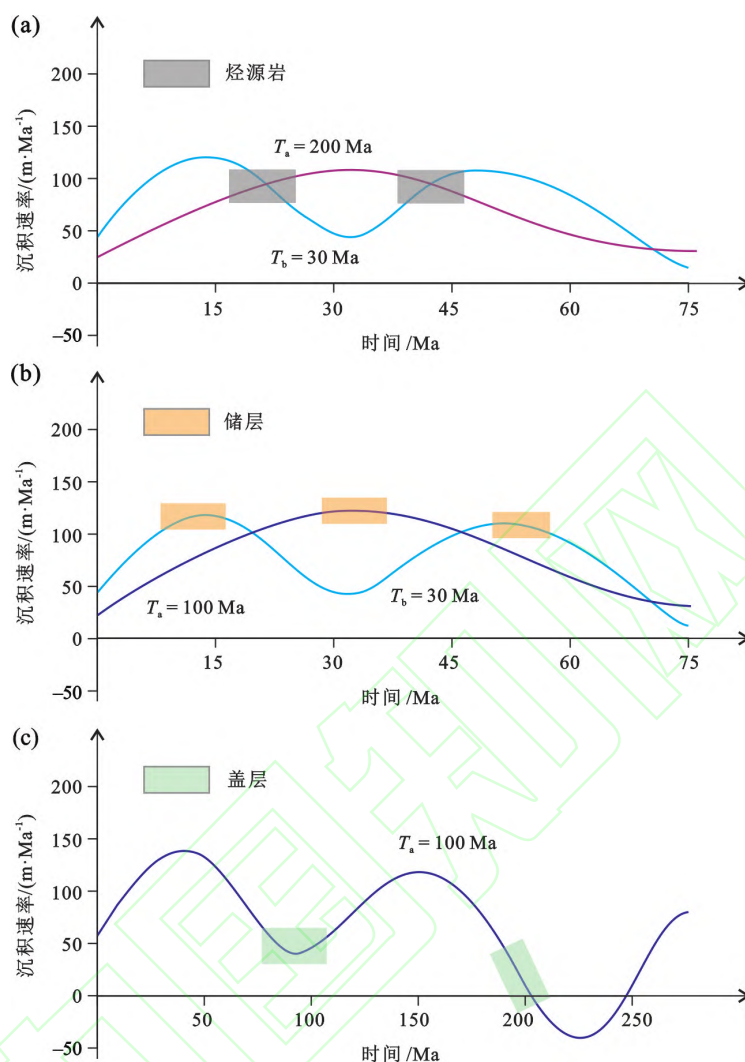


图6 多尺度波动过程叠加控制的生储盖层配置示意图

(据文献[40,60]修改)

Fig. 6 Configuration of the source-reservoir-cap strata controlled by the superposition of multi-scale fluctuational processes. Modified after [40, 60].

覆沉积,响应于长周期的波动过程,通常发育在波动曲线的波谷位置(图6C)^[40,60]。

多尺度波动叠加控制下的生储盖层的配置关系表明,波谷带与波峰带之间的波动转换带可能成为油气聚集成藏的有利位置^[2,41]。例如,塔里木盆地约200 Ma和约30 Ma周期波的叠加主要控制寒武系—中志留统、石炭系—下二叠统、侏罗系等烃源岩层系的发育;~100 Ma和~30 Ma周期波的叠加主要控制寒武系—奥陶系、上志留统—下二叠统、三叠系等储层的发育。由于沉积环境的多样性和沉积条件变化的复杂性,只有综合对比研究各种沉积环境下的多尺度波动过程,建立相对完善的沉积模型,才能得出符合实际的地质认识。

3.4 隆拗变迁规律与油气藏保存的关系

地壳波状运动表现为隆起和拗陷的长期发展,隆起和拗陷可以慢慢迁移,直至消失而后重新形成^[20]。箕状凹陷演化、沉积(沉降)中心与隆起中心的迁移、地层的掀斜运动、不整合面的穿时特征等是波阵面到达时间有先后的直观体现,反映了地壳波状运动持续向前迁移。盆地地质构造在空间上的等距性与同向性也是波动过程叠加的结果^[13,15,31]。根据“地壳波浪状镶嵌构造”学说,波谷带与波谷带相交形成拗陷,波峰带与波峰带相交形成隆起(或剥蚀区);波峰带与波谷带相交则形成复杂的构造格局^[14]。

渤海湾盆地鲁西地区形成的箕状凹陷为不同级

次的地壳波状运动叠加传递的典型实例(图7)^[15]。自鲁西隆起至济阳—渤中拗陷为区域性倾斜,相当于一级波状运动波峰(或波谷)的一翼(曲线I)。在此区域背景上,叠加了由鲁东、鲁西块体碰撞引起的二级波状运动(曲线II)。后者波峰、波谷的位置分别决定了凸起和凹陷的位置,而波的向前传播决定了沉降中心的迁移。在统一的构造作用下,应力集中的拐点(a, b, c点)易形成断裂。总之,地壳波状运动控制了渤海湾盆地箕状凹陷等距分布,沉降中心与同生断层有规律地转移等特征。值得注意的是,地壳波状运动并不表示盆地形成演化的简单重复,而随着引起波浪运动的原因和自身构造属性的变化,每一期旋回中盆地的演化特征都各具特色^[25]。

隆起和拗陷的动力学演化是油气形成与聚集成藏的关键环节^[20]。油气成藏的旋回性,与盆地构造和沉积波动过程相关,油气藏在平面上的分布规律受波状展布的构造单元的影响。通过分析构造形成的动力条件、动力来源,预测构造的迁移规律,对寻找油气圈闭有重要意义。对于多期生烃、多期成藏的古隆起,保存与破坏的矛盾是制约油气赋存及其规模的关键。从油气聚集的角度看,隆起高部位最为有利;从后期保存的角度看,隆起高部位最容易受到破坏。隆起与拗陷的差异沉降可以使构造溢出点改变,导致油气再次运移,成藏及成藏期后的沉降对油气性质改变也起到控制作用^[48]。

4 未来发展讨论

从理论和应用两个维度考虑,沉积盆地波动过

程研究未来应关注以下主要问题和发展方向。

4.1 开展超长天文周期驱动的沉积盆地波动演化研究

天文周期在地质记录中留下了各种印记,目前在地球轨道尺度(米兰科维奇周期)的研究取得了巨大进展^[61-63],并成为当前沉积学研究的热门领域之一。但针对百万年以上尺度的地质过程与超长天文周期的关系的研究,还没有引起足够重视^[6,9]。越来越多的证据表明,多尺度地球节律与银河系引力势场变化、太阳系穿越银河旋臂、太阳系穿越银盘面以及地球轨道周期等具有潜在的成因联系^[2,10,46,63]。因此,对沉积盆地波动的天文驱动机制的研究需要兼顾与地球轨道周期相关的短期变化以及与太阳系轨道周期相关的长期波动的复杂影响。

需要注意的是,构造运动在一定程度上干扰沉积记录对天文周期的响应,如何甄别或剔除构造作用带来的影响是关键。例如,湖盆类型不一样,对天文周期的响应方式也不一样^[39]。同一个天文周期尺度内,甚至同处一个气候带内,不同盆地对气候变化的响应以及岩性发育可能出现截然相反的现象,这是由于盆地自身构造属性不同造成的。

4.2 开展地球深部动力学旋回驱动的沉积盆地波动演化研究

沉积盆地中的沉积充填和所保存的构造形迹蕴含着丰富的地球动力学信息和地壳变动信息。对沉积盆地波动机理的探索应当兼顾水平运动和垂向运动^[7]。在克拉通内部缺乏挤压碰撞的构造环境中,盆地波动现象容易辨析。而在板块俯冲带、前陆造山带等作用力复杂的构造环境中,多期构造旋回导

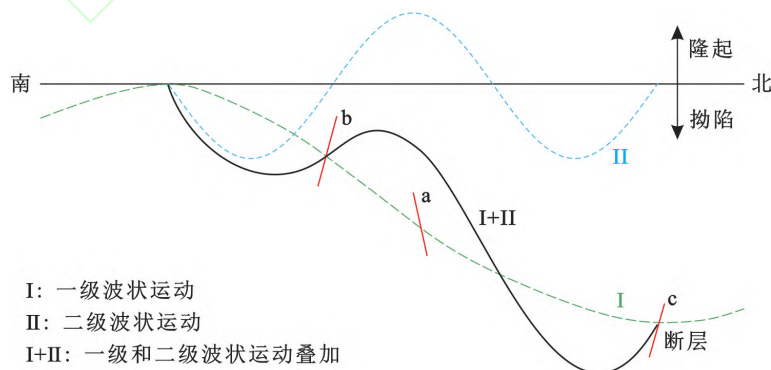


图7 地壳波状运动控制渤海湾盆地箕状凹陷演化示意图

(据文献^[15]修改)

Fig. 7 Crustal fluctuations controlling the evolution of dustpan-shaped depressions in Bohai Bay Basin. Modified after ^[15].

致叠合盆地形成复杂的地层结构,沉积盆地会加速沉积或加速剥蚀,增加了波动解译的复杂性^[60]。

沉积盆地波动过程除受板块运动体制的控制外,还受地球深部地幔甚至地核物质周期性运动的影响。越来越多的地质证据表明,一些重要的深部地质过程都存在一定程度的周期性,例如,超大陆的聚合与裂解、地核-地幔边界热流的波动、地幔对流、洋壳热点发育、洋壳俯冲、大陆地壳的生长与保存、大火成岩省的形成以及区域岩浆活动等^[26-27,64]。板块运动是一个脉动的过程,威尔逊旋回是一种全球性的旋回现象,地幔柱的活动也显示出垂直运动的周期行为^[30,65]。板块相互作用和地幔动力学的研究进展为研究盆地深部地质过程提供了重要依据^[4,66-67],使人们有机会从地球动力学的角度审视沉积盆地的形成和演化过程。

地球深部流体和挥发分是认识圈层相互作用的重要切入点。深部断裂和岩浆侵入会诱发深部流体活动,地幔岩浆熔融和火山作用伴随着深部挥发分的大量释放^[58]。我国的许多含油气盆地,包括东部中-新生代新构造体制裂陷盆地和中西部古老的克拉通盆地,都是深部地质作用活跃的区域^[68]。有必要进一步研究深部地质作用与盆地热演化波动之间的关系,深部流体活动在物质和能量循环中的作用及其对盆地油气成藏旋回过程产生的影响。随着对地球深部地质过程周期性演化认识的不断深入,盆地波动过程分析将形成更具特色的理论体系。

4.3 加强地质证据与数值模拟技术融合,完善盆地波动过程分析方法

基于地壳波动思想发展起来的沉积盆地波动过程分析领域尚有许多技术问题亟待解决。跨“不整合”超长地层记录解译是盆地波动过程分析的痛点。Sadler^[69]对地史时期 25 000 个沉积速率的汇编表明,时间跨度越长,地层剖面中的间断越长。对于同一套研究层位,当选择的时间尺度不同时,地层完整性评价结果存在较大差异^[38]。在沉积间断时间远大于有沉积记录的时间的地层背景下,如何有效开展周期信号处理及其置信检验面临挑战。

我们通常以沉积速率为地层属性参数开展波动分析^[59]。要准确地计算各研究区不同时期的沉积速率,必须准确建立年代地层框架,而年代地层框架的分辨率和精确度受生物地层学、磁性地层学、同位素地层学、旋回地层学等学科研究的限制。地层原

始厚度恢复也是影响沉积速率计算准确性的关键因素之一,而原始地层厚度恢复需要孔隙度与深度资料^[21],同时还取决于盆地演化史模型的可靠程度^[70]。

盆地波动分析方法与盆地模拟技术、油气成藏动力学研究的结合,建立油气成藏演化的动态模型,为更准确地分析油气藏的形成及破坏过程提供了有效途径。现阶段盆地动力学模拟技术已经相对成熟,为解析盆地的沉降史、埋藏史、热演化史等提供了有力工具^[70-71],从而可以用于校正利用波动方程建立的沉积埋藏史精细模型。在构建盆地沉降史波动模型的基础上,可以进一步搭建盆地热历史波动模型^[57],结合盆地古温标的模拟进行校正,为盆地油气资源评价提供地热参数,实现与生-排烃史研究的耦合。

地球系统模拟技术提升了我们对深时水循环与深部碳循环复杂过程的预测能力^[55,61-62,66];有必要进一步开发适用于超长周期尺度(百万年以上)的地球动力学数值模型、沉积正演模型等^[72],以期更好地恢复盆地形成与演化的动态过程。

针对单个沉积盆地波动周期的解译是不够的,盆地波动研究需要结合全球综合地层数据库^[73]等,对全球不同时代与不同构造背景的沉积盆地,开展多尺度地质节律的大数据挖掘,寻找共性与差异。在前期方法探索的基础上,我们也需要在原始资料获取上投入更多精力。以中国大洋发现计划为代表的科学钻探已经取得了显著的成效,充分利用好我国典型盆地的大陆科学钻探井、超深层油气勘探井资料,可以为盆地波动过程分析提供有益的数据支撑。

4.4 推进盆地波动理论成果转化,全面理解圈层相互作用与资源环境效应

沉积盆地发育的地层序列记录了地球系统的长期旋回和潜在的驱动力^[6,10,37]。天文旋回与地球深部动力学旋回是地质历史上黑色页岩沉积的重要推手^[11]。一方面,盆地规模优质烃源岩发育受到太阳系轨道周期与地球轨道周期的叠加调控;另一方面,地壳的升降运动,作为地球固体圈层的一个重要节律,影响大陆风化作用,进而影响营养物质供给和有机碳循环。有必要以地球圈层相互作用为指导思想,以地球各圈层周期节律的耦合为纽带,协同天文与地内因素综合研究盆地构造-沉积波动响应。这对理解地球圈层间物质能量循环及其对资源环境的影

响具有重要科学价值。

盆地波动过程分析能够从成因角度预测生储盖层的发育规律,对油气成藏主控因素研究具有重要意义。我国陆相页岩油勘探的进展凸显了对烃源岩发育机制进行研究的必要性^[74-75]。在多尺度波动过程叠加的背景下,页岩油富集的成藏过程、成因机理与分布规律仍有待明确。通过系统研究天文周期与地球深部地质作用的调控机制,可以为优质烃源岩的沉积过程和发育环境分析提供新思路。未来更需要充分发挥盆地波动分析技术对油气分布规律的预测功能,丰富完善盆地波动过程制约下的油气富集理论与评价方法,为油气资源远景评价与勘探提供科学依据。

5 结论

(1)波动是地球系统各个圈层运动的基本形式之一,沉积盆地的波状运动是板块内部地壳运动的主要表现形式。盆地波动过程分析通过确定波动方程,可以预测在长期的地质过程中可能发生的各种地质作用,是我们认识油气成藏地质条件和活动规律的关键手段。

(2)盆地波动过程分析的主要研究内容包括:从地球系统观出发,研究盆地波动的成因机制;探索盆地波动分析方法,提取不同尺度的周期波曲线,建立波动方程;在理论层面,揭示盆地波动过程中的基础地质规律;在应用层面,结合成藏因素与成藏作用分析,探索盆地波动过程对油气生成与分布的控制。

(3)全球沉积盆地的演化主要呈现约 740 Ma、220 Ma、90 Ma、30 Ma 和约 10 Ma 等长周期波动。沉积盆地的生成与消亡,沉积与剥蚀乃至岩性的旋回变化都受着上述各种周期运动的共同控制。盆地地壳的升降运动表现为隆起或拗陷的周期性转变,决定着盆地沉积埋藏史、生储盖层配置、烃源岩热演化、圈闭保存条件等油气成藏要素,使油气成藏具有旋回性发展的特点。盆地波动分析量化方法能够恢复不整合的形成过程,是计算盆地剥蚀量的特色手段。多尺度波动过程的叠加通过控制沉积速率变化,影响岩性旋回发育,间接影响生储盖的发育及配置关系。

(4)展望沉积盆地波动过程研究的发展方向,应着重开展超长天文周期与地球深部动力学旋回驱动的盆地波动机制研究,探索盆地构造-沉积波动响

应。强化地质证据研究与数值模拟技术融合,完善盆地波动过程分析方法。进一步推进盆地波动理论成果转化以全面理解圈层相互作用与资源环境效应,充分发挥盆地波动分析技术对油气藏分布规律的预测功能。这些研究对于深入认识地球系统演变具有重要科学意义与指导油气资源勘探的实际价值。

衷心感谢各位专家及编辑在审稿过程中对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献

- [1] 金之钧, 张一伟, 刘国臣, 等. 沉积盆地物理分析: 波动分析[J]. 地质论评, 1996, 42(增刊): 170-180.
- [2] 金之钧等 著. 沉积盆地波动过程分析[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [3] CHEN S, JIN Z, WANG Y, et al. Sedimentation rate rhythms: evidence from filling of the Tarim Basin, Northwest China[J]. Acta Geologica Sinica - English Edition, 2015, 89(4): 1264-1275.
- [4] BOULILA S, PETERS S E, MÜLLER R D, et al. Earth's interior dynamics drive marine fossil diversity cycles of tens of millions of years[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2023, 120(29): e2221149120.
- [5] BRINK H J. Cosmic contributions to the deposition of petroleum source rocks: review and analysis[J]. International Journal of Geosciences, 2023, 14(11): 1123-1145.
- [6] RAMPINO M R, CALDEIRA K, RODRIGUEZ S. Cycles of ~32.5 Ma and ~26.2 Ma in correlated episodes of continental flood basalts (CFBs), hyper-thermal climate pulses, anoxic oceans, and mass extinctions over the last 260 Ma: Connections between geological and astronomical cycles[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 246: 104548.
- [7] ALLEN P A, ALLEN J R. Basin analysis: principles and application to petroleum play assessment[M]. 3rd ed. Chichester, UK: Wiley-Blackwell Press, 2013.
- [8] IKEDA M, TADA R. Reconstruction of the chaotic behavior of the Solar System from geologic records[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 537: 116168.
- [9] ZHANG R, JIN Z, LI M, et al. Long-term periodicity of sedimentary basins in response to astronomical forcing: review and perspective[J]. Earth-Science Reviews, 2023, 244: 104533.
- [10] BOULILA S, HAQ B U, HARA N, et al. Potential encoding of coupling between Milankovitch forcing and Earth's interior processes in the Phanerozoic eustatic sea-level record[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 220: 103727.
- [11] JIN Z, WANG X, WANG H, et al. Organic carbon cycling and black shale deposition: an Earth System Science per-

- spective[J]. National Science Review, 2023, 10 (11): nwad243.
- [12] VAN BEMMELEN, R W. The undation theory[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Press, 1932.
- [13] 陈书平. 圆动与地动[M]. 北京: 石油工业出版社, 2019.
- [14] 张伯声, 王战. 中国的镶嵌构造与地壳波浪运动[J]. 西北大学学报(自然科学版), 1974(1): 7-17.
- [15] 张一伟. 山东西部箕状凹陷形成的探讨: 初论地壳波状运动[J]. 石油学报, 1983(4): 19-25.
- [16] 施比伊曼, 张一伟, 金之钧, 等. 波动地质学在黄骅坳陷演化分析中的应用: 再论地壳波状运动[J]. 石油学报, 1994(增刊): 19-26.
- [17] 刘国臣, 李京昌, 金之钧, 等. 波动地质学研究中资料的收集与整理[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1994(6): 1-7.
- [18] 金之钧, 王清晨. 中国典型叠合盆地与油气成藏研究新进展: 以塔里木盆地为例[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2004(增刊): 1-12.
- [19] 金之钧, 张一伟, 陈书平. 塔里木盆地构造-沉积波动过程[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2005(6): 530-539.
- [20] 金之钧, 李有柱, 李明宅, 等. 油气聚集成藏理论[M]. 北京: 石油工业出版社, 2000.
- [21] 张一伟, 李京昌, 金之钧, 等. 原型盆地剥蚀量计算的新方法: 波动分析法[J]. 石油与天然气地质, 2000(1): 88-91.
- [22] Frank S. Crawford. 伯克利物理学教程(SI版)第3卷 波动学(翻译版)[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [23] LASKAR J, ROBUTEL P, JOUTEL F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Astronomy & Astrophysics, 2004, 428(1): 261-285.
- [24] BOULILA S, BRANGE C, CRUZ A M, et al. Astronomical pacing of Late Cretaceous third- and second-order sea-level sequences in the Foz do Amazonas Basin[J]. Marine and Petroleum Geology, 2020, 117: 104382.
- [25] 金之钧, 刘国臣, 李京昌, 等. 塔里木盆地一级演化周期的识别及其意义[J]. 地学前缘, 1998(增刊): 194-200.
- [26] MITCHELL R N, SPENCER C J, KIRSCHER U, et al. Harmonic hierarchy of mantle and lithospheric convective cycles: time series analysis of hafnium isotopes of zircon[J]. Gondwana Research, 2019, 75: 239-248.
- [27] PUETZ S J, CONDIE K C. A review of methods used to test periodicity of natural processes with a special focus on harmonic periodicities found in global U-Pb detrital zircon age distributions[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 224: 103885.
- [28] 张一伟, 李京昌, 金之钧, 等. 中国含油气盆地波状运动特征研究[J]. 地学前缘, 1997(增刊): 309, 311-315.
- [29] 汤良杰, 马永生, 郭彤楼, 等. 沉积盆地波动过程分析方法与应用: 以四川盆地东北部为例[J]. 海相油气地质, 2005(4): 39-46.
- [30] WILSON R W, HOUSEMAN G A, BUITER S J H, et al. Fifty years of the Wilson Cycle concept in plate tectonics: an overview[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2019, 470(1): 1-17.
- [31] BELOZEROV V B, IVANOV I A. Platform deposition in the West Siberian Plate: a kinematic model[J]. Russian Geology and Geophysics, 2003, 44(8): 781-795.
- [32] 李京昌, 金之钧, 刘国臣. 论塔里木盆地构造反转的周期性[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1998(3): 14-17, 28+4.
- [33] 李京昌, 金之钧, 刘国臣, 等. 100 Ma: 塔里木盆地演化的重要周期[J]. 地学前缘, 1997(增刊): 316-321.
- [34] CHEN S. The earth dynamic system: the earth rotation vs mantle convection[J]. Natural Science, 2010, 2(12): 1333-1340.
- [35] FRIEDRICH A M, BUNGE H-P, RIEGER S M, et al. Stratigraphic framework for the plume mode of mantle convection and the analysis of interregional unconformities on geological maps[J]. Gondwana Research, 2018, 53: 159-188.
- [36] WANG Y, CAO Z, PENG L, et al. Secular craton evolution due to cyclic deformation of underlying dense mantle lithosphere[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(7): 637-645.
- [37] 张瑞, 金之钧, GILLMAN M, 等. 太阳系长期旋回在中生代沉积盆地中的记录[J]. 中国科学: 地球科学, 2023, 53(2): 345-362.
- [38] GINGERICH P D. Rates of geological processes[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 220: 103723.
- [39] OPLUŠTIL S, LAURIN J, H LOVÁ L, et al. Coal-bearing fluvial cycles of the late Paleozoic tropics; astronomical control on sediment supply constrained by high-precision radioisotopic ages, Upper Silesian Basin[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 228: 103998.
- [40] 李儒峰, 金之钧, 马永生, 等. 盆地波动特征与生储盖层耦合关系分析: 以楚雄盆地为例[J]. 沉积学报, 2004(3): 474-480.
- [41] 金之钧, 李京昌, 汤良杰, 等. 柴达木盆地新生代波动过程及与油气关系[J]. 地质学报, 2006(3): 359-365.
- [42] 李儒峰, 杨永强, 张刚雄, 等. 松辽北部徐家围子白垩系不整合剥蚀量系统恢复[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 2012, 37(增刊): 47-54.
- [43] 孟祥化, 葛铭, 任国选, 等. 宇地系统场沉积响应范例: 蓟县系雾迷山巨旋回层序及节律[J]. 地学前缘, 2011, 18(4): 107-122.
- [44] RAMPINO M R, CALDEIRA K. A 32-million year cycle detected in sea-level fluctuations over the last 545 Ma[J]. Geoscience Frontiers, 2020, 11(6): 2061 - 2065.
- [45] IKEDA M, TADA R, OZAKI K. Astronomical pacing of the global silica cycle recorded in Mesozoic bedded cherts[J]. Nature Communications, 2017, 8(1): 15532.
- [46] SPROVIERI M, SABATINO N, PELOSI N, et al. Late Cretaceous orbitally-paced carbon isotope stratigraphy from the Bottaccione Gorge (Italy)[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 379-380: 81-94.
- [47] 吕修祥, 张一伟, 金之钧. 塔里木盆地成藏旋回初论[J]. 科

- 学通报, 1996(22): 2064-2066.
- [48] 刘国臣, 张一伟. 从波动观点看塔里木盆地的成藏演化史[J]. 石油学报, 1999(2): 15-19+3.
- [49] 李京昌, 金之钧, 刘国臣. 盆地沉降史研究的新方法: 波动分析[J]. 地球科学进展, 1997(5): 82-86.
- [50] KELLER C B, HUSSON J M, MITCHELL R N, et al. Neoproterozoic glacial origin of the Great Unconformity [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2019, 116(4): 1136-1145.
- [51] 刘国臣, 金之钧, 李京昌. 沉积盆地沉积-剥蚀过程定量研究的一种新方法: 盆地波动分析应用之一[J]. 沉积学报, 1995(3): 23-31.
- [52] 张一伟, 金之钧, 刘国臣, 等. 塔里木盆地环满加尔地区主要不整合形成过程及剥蚀量研究[J]. 地学前缘, 2000(4): 449-457.
- [53] 范婕, 蒋有录, 崔小君, 等. 恢复不整合剥蚀厚度的旋回分析法[J]. 中国矿业大学学报, 2018, 47(2): 323-331.
- [54] SCOTese C R, SONG H, MILLS B J W, et al. Phanerozoic paleotemperatures: the earth's changing climate during the last 540 million years[J]. Earth-Science Reviews, 2021, 215: 103503.
- [55] HU Y, LI X, BOOS W R, et al. Emergence of the modern global monsoon from the Pangaea megamonsoon set by palaeogeography[J]. Nature Geoscience, 2023, 16(11): 1041-1046.
- [56] 邱楠生, 金之钧, 刘国臣, 等. 沉积盆地热演化波动问题初探[J]. 地质论评, 1996, 42(增刊): 302-306.
- [57] 邱楠生, 金之钧, 李京昌. 塔里木盆地热演化分析中热史波动模型的初探[J]. 地球物理学报, 2002(3): 398-406.
- [58] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(3): 499-520.
- [59] 张瑞, 金之钧, 朱如凯, 等. 中国陆相富有机质页岩沉积速率研究及其页岩油勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(4): 829-845.
- [60] 李儒峰, 郭彤楼, 陈国飞, 等. 米仓山前陆冲断带波动特征与构造沉积演化[J]. 中国科学(D辑: 地球科学), 2008(增刊): 63-69.
- [61] WANG M, LI M, KEMP D B, et al. Late Triassic sedimentary records reveal the hydrological response to climate forcing and the history of the chaotic Solar System[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 607: 118052.
- [62] WEI R, JIN Z, ZHANG R, et al. Orbitally-paced coastal sedimentary records and global sea-level changes in the early Permian[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2023, 620: 118356.
- [63] WU H, FANG Q, HINNOV L A, et al. Astronomical time scale for the Paleozoic Era [J]. Earth-Science Reviews, 2023, 244: 104510.
- [64] MJELDE R, FALEIDE J I. Variation of Icelandic and Hawaiian magmatism: evidence for co-pulsation of mantle plumes? [J]. Marine Geophysical Researches, 2009, 30(1): 61-72.
- [65] 陈凌, 王旭, 梁晓峰, 等. 俯冲构造 vs. 地幔柱构造: 板块运动驱动力探讨[J]. 中国科学: 地球科学, 2020, 50(4): 501-514.
- [66] MÜLLER R D, MATHER B, DUTKIEWICZ A, et al. Evolution of Earth's tectonic carbon conveyor belt[J]. Nature, 2022, 605(7911): 629-639.
- [67] 朱日祥, 赵盼, 万博, 等. 新特提斯单向俯冲的动力学机制[J]. 科学通报, 2023, 68(13): 1699-1708.
- [68] 何治亮, 李双建, 刘全有, 等. 盆地深部地质作用与深层资源: 科学问题与攻关方向[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 767-779.
- [69] SADLER P M. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections[J]. The Journal of Geology, 1981, 89(5): 569-584.
- [70] LICCIARDI A, GALLAGHER K, CLARK S A. A bayesian approach for thermal history reconstruction in basin modeling [J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 2020, 125(7): e2020JB019384.
- [71] 陈昌锦, 程晓敢, 林秀斌, 等. 基于弹性板模型的塔里木盆地北部新生代沉降模拟: 对南天山隆升的启示[J/OL]. 地学前缘: 1-15[2024-01-31].
- [72] 刘可禹, 刘建良. 盆地沉积充填演化与含油气系统耦合模拟方法在超深层油气成藏模拟中的应用: 以四川盆地中部震旦系灯影组为例[J]. 石油学报, 2023, 44(9): 1445-1458.
- [73] PETERS S E, QUINN D P, HUSSON J M, et al. Macrostratigraphy: insights into cyclic and secular evolution of the earth-life system[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2022, 50(1): 419-449.
- [74] 金之钧等 编著. 中国页岩油资源发展战略研究[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- [75] 赵文智, 朱如凯, 刘伟, 等. 我国陆相中高熟页岩油富集条件与分布特征[J]. 地学前缘, 2023, 30(1): 116-127, 242-259.