

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.122>



苏北盆地高邮凹陷定量旋回地层分析与 顺层方解石脉 U-Pb 定年约束

肖雪薇¹, 陈红汉^{1*}, 许可², 苏奥¹, 于雯泉³

1. 中国地质大学资源学院石油地质系, 湖北武汉 430074
2. 中国地质大学海洋学院, 湖北武汉 430074
3. 中国石油化工股份有限公司江苏油田分公司勘探开发研究院, 江苏扬州 225009

摘要:长期以来沉积地层因缺乏稳定放射性同位素计时, 其地层的绝对年龄标定成为地层学和石油地质学研究中的瓶颈。运用定量旋回地层学的理论和方法, 结合顺层纤维状方解石超低浓度U-Pb定年约束, 重新厘定了苏北盆地高邮凹陷古近系主要界面绝对年龄, 得到了与前人不同的“三垛运动”时限和“二元”裂陷构造变革面与太平洋板块俯冲转向的时间(~ 50 Ma)耦合关系。分析认为, 高邮凹陷三垛组顶界年龄为34.0 Ma, 底界年龄为43.3 Ma; 戴南组底界年龄为50.5 Ma; 阜二段底界年龄为56.5 Ma; 阜一段的底界年龄为66.0 Ma。位于洼陷区的永38井三垛组残留地层持续时间为8.28 Ma, 抬升剥蚀起始年龄为34.06 Ma, 结束年龄为23.03 Ma, 剥蚀时限为11.03 Ma。而隆起和斜坡带三垛组开始剥蚀的时间要早于34.06 Ma, 剥蚀的时限会更长一些。阜四段方解石脉超低浓度U-Pb定年结果为 53.1 ± 3.7 Ma。这些结果表明:(1)苏北盆地高邮凹陷~50 Ma和~23.03 Ma界面是太平洋板块俯冲转向和印度板块与欧亚板块碰撞的构造响应, 高邮凹陷沉积中心在始新世晚期(34.06 Ma)就开始抬升, 历经11.03 Ma的剥蚀, 主要原因可能与印度-欧亚板块碰撞在华南陆块总体表现以挤压为主而缺乏NE向深部幔隆的远距离效应有关;(2)烃源岩层系中发育的顺层纤维状方解石脉超低浓度U-Pb定年结果可以作为其地层的沉积年龄, 从而为沉积盆地定量旋回地层学分析提供了锚点约束。

关键词:高邮凹陷; 旋回地层; 锚点; 顺层纤维状方解石脉; U-Pb定年; 三垛运动; 剥蚀时限; 石油地质。

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2023)11-4088-15

收稿日期: 2021-05-24

Quantitative Cyclostratigraphy Analysis and Constraint by U-Pb Dating of Bedding-Parallel Fibrous Calcite Vein in Gaoyou Sag, Subei Basin

Xiao Xuewei¹, Chen Honghan^{1*}, Xu Ke², Su Ao¹, Yu Wenquan³

1. Department of Petroleum Geology, Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
2. College of Marine Science and Technology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China
3. Exploration and Development Research Institute of Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou 225009, China

Abstract: Due to the lack of stable radioisotopic chronoscope in sedimentary strata for a long time, determination of their absolute ages has become the bottleneck both in stratigraphic and petroleum geological investigations. In this paper it uses quantitative

基金项目:国家重点自然科学基金项目(No.41730421);中国石化股份公司科技部重大项目(No. ZDP17015)。

作者简介:肖雪薇(1991—), 博士研究生, 主要从事页岩气评价和流体包裹体系统分析方面的研究. ORCID: 0000-0003-2111-216X. E-mail: xwxiao@cug.edu.cn

* 通讯作者:陈红汉, E-mail: hhchen@cug.edu.cn

引用格式:肖雪薇, 陈红汉, 许可, 苏奥, 于雯泉, 2023. 苏北盆地高邮凹陷定量旋回地层分析与顺层方解石脉U-Pb定年约束. 地球科学, 48(11):4088—4102.

Citation: Xiao Xuewei, Chen Honghan, Xu Ke, Su Ao, Yu Wenquan, 2023. Quantitative Cyclostratigraphy Analysis and Constraint by U-Pb Dating of Bedding-Parallel Fibrous Calcite Vein in Gaoyou Sag, Subei Basin. *Earth Science*, 48(11):4088—4102.

cyclostratigraphy theory and method, combining with the constraint by U-Pb dating of bedding-parallel fibrous calcite, to re-determine the absolute age of the main stratigraphic interfaces of the Gaoyou sag in Subei basin, and obtains the different duration of Sanduo movement and the coupling relationship in time between the structural transforming surface of dual rifting stages and the Pacific plate subduction bending (50 Ma±). The top and base of Sanduo Formation in Gaoyou sag are 34.0 Ma and 43.3 Ma respectively. The base of Dainan Formation is 50.5 Ma and that of Fu 1 and Fu 2 Members are 66.0 Ma and 56.5 Ma individually. The duration of residual strata of Sanduo Formation from Yong'an 38, which is in the sub-sag area, is 8.28 Ma, and its starting age of uplift denudation is 34.06 Ma, while the end is 23.03 Ma, which means the denudation time is 11.03 Ma. The time of denudation of uplift and slope was earlier than 34.06 Ma, and the time of denudation was longer. The U-Pb dating of Fu 4 member is 53.1 ± 3.7 Ma. The results show follows: (1) The 50 Ma± and 23.03 Ma± interfaces in Gaoyou sag of the Subei basin are tectonic responses of the Pacific plate subduction bending and the collision between the Indian plate and the Eurasian plate. The depocenter of Gaoyou sag early uplifted comparatively since the Late Eocene (34.06 Ma) and underwent the denudation span of 11.03 Ma. The main reason is perhaps related to the remote effect of the overall performance of Indo-Eurasian plate collision with compression regime in the South China block, and lack of NE-trending deep mantle uplift. (2) The U-Pb dating result of bedding-parallel fibrous calcite veins developed in the source rock system can be used as the sedimentary age of the strata, providing an excellent anchor point constraint for quantitative cyclostratigraphic analysis of sedimentary basins.

Key words: Gaoyou sag; cyclostratigraphy; anchor point; bedding-parallel fibrous calcite vein; U-Pb dating; Sanduo movement; denudation time span; petroleum geology.

0 引言

扬子地块和华北地块在晚奥陶世发生初始碰撞并于晚三叠世完成了拼贴缝合过程(贾承造等, 1988; 邓红等, 2021)之后,便进入了中国东部大陆边缘的构造发展阶段.这个阶段华北和华南地块的成盆动力学背景受控于太平洋板块向西俯冲、印度板块向北俯冲于欧亚板块下以及中生代鄂霍次克海的消亡导致中亚造山带向南俯冲所围限的“中心三角形地带”超级汇聚作用,但华北克拉通东部以张性构造为特征,而华南陆块总体以压性构造为特征(李三忠等, 2011; 许志琴等, 2016; 许成等, 2019; 郑洪伟等, 2020; 郭腾达等, 2021; Ying et al., 2022).

位于郯庐断裂带东侧的苏北盆地是晚中生代以后、在下扬子地台北缘发育起来的大型沉积盆地.自下而上发育泰州组(K_2t)、阜宁群(E_1f)、戴南组(E_2d)、三垛组(E_2s)、盐城组(N_1y)和第四系东台组(Q_d),渐新统基本缺失(图1).受盆地所处构造位置和基底性质的共同影响,苏北盆地既不同于西部扬子地块上发育的其他盆地(如四川盆地),也有别于东部华北地块上的盆地(如渤海湾盆地)(陈友飞等, 1993; 邱海峻等, 2006).除了盆内极为复杂的断裂、斜向伸展-挤压构造样式和反转叠置的凹陷结构之外,苏北盆地从裂陷→裂后转化(BU面)的时间早(渐新世)、抬升剥蚀时间长和剥蚀量大(三垛运动)等而有别于中国东部大

陆边缘的其他新生代盆地.这种认识主要基于金坛三垛组夹层中的3个玄武岩K-Ar年龄(46.1 Ma、43.5 Ma和43.5 Ma)(吴利仁, 1984; 胡晓春, 2010)、生物地层(关绍曾, 1986)和裂变径迹(张沛等, 2009)以及区域层序地层对比(张喜林等, 2004)而建立的地层综合柱状图(图1).“三垛运动”是苏北盆地古近纪末期一次重要的构造运动,应力方向以SN拉张为主,凹陷边界断层活动强烈,凹陷内断裂网络复杂多样,北部抬升而南部相对沉降,形成典型的箕状盆地(陈安定, 2010).不同研究者不仅对三垛运动剥蚀时限认识不一,而且在年代地层划分方面也存在一些差异.归纳起来有3种不同的方案(图1):①三垛组底界年龄为50.5 Ma,三垛运动自始新世中期38.0 Ma开始抬升,一直到24.6 Ma,历经13.4 Ma的剥蚀(张喜林等, 2004; 徐田武等, 2008; 邓丽娟等, 2009; 能源等, 2009);②三垛组底界年龄为50.5 Ma,三垛运动自始新世中期37.0~33.7 Ma不均衡抬升,一直到24.6 Ma,历经12.4~11.1 Ma的剥蚀(江苏油田, 2005. 苏北盆地第三系隐蔽油藏基础研究; 王海方, 2016);③三垛组底界年龄为46.0 Ma,三垛运动自始新世中期37.0~33.7 Ma开始抬升,一直到23.5 Ma,历经13.5~10.2 Ma的剥蚀(陈安定, 2010).更有研究者认为三垛运动的剥蚀时限有18 Ma(钱基, 2000, 2001; 姚合法等, 2005)、17.4 Ma(吴向阳等, 1999);根据裂变径迹热史模拟认为三垛运动挤压抬升时限为35~22 Ma,历时13 Ma(张沛等, 2009).

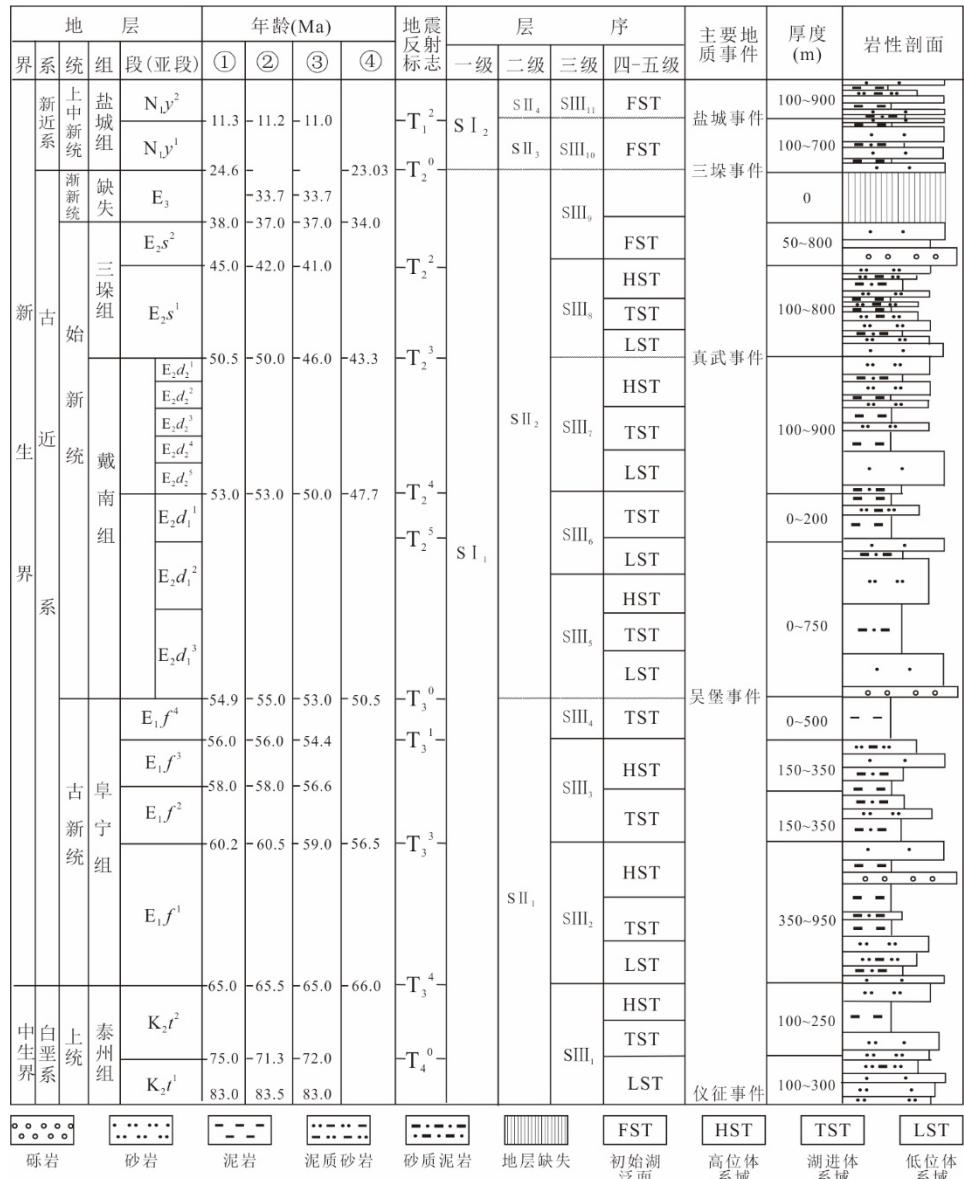


图1 苏北盆地地层单元划分及综合岩性柱状图

Fig. 1 The stratigraphic unit division and synthetic lithological column in Subei basin

^①文献(张喜林等,2004;徐田武等,2008;邓丽娟等,2009;能源等,2009);^②文献(江苏油田,2005.苏北盆地第三系隐蔽油藏基础研究;王海方,2016);^③文献(陈安定,2010);^④本研究

由此可见,厘定三垛运动的时限是至关重要的,因为这不仅影响到盆地埋藏史恢复和烃源岩生烃热演化模拟以及油气成藏期次和时期的认识(陈安定和唐焰,2007;李儒峰等,2010),而且还涉及到对三垛组残留地层油气勘探潜在目标的认识。为此,本文将以最新的国际地质年代表中新生界底界年龄(66 Ma)(Gradstein *et al.*, 2012)为锚点,主要选取洼陷中央的永38井、花X27井和瓦X21井断层不发育时段的自然伽马曲线(GR),运用定量旋回地层学的方法获取各界面绝对年龄以及三垛运动的时限;同时,开展了黄158井阜宁组阜四段页岩中

顺层同向纤维状方解石超低浓度 U-Pb 定年分析：

1 自然伽马测井曲线及锚点的选取

自然伽马测井(*GR*)是测量井内岩层的放射性元素衰变过程中放射出伽马射线的强度.而这些放射性元素(*U*、*Th*、*K*)主要富集在泥质沉积物中.因此,自然伽马曲线即指示着泥质含量的变化,从而能够反映沉积地层的旋回性变化.前人研究表明,*GR*曲线对气候变化比较敏感,可以作为湖盆沉积环境与气候变化的替代指标(Hinnov and Hil-

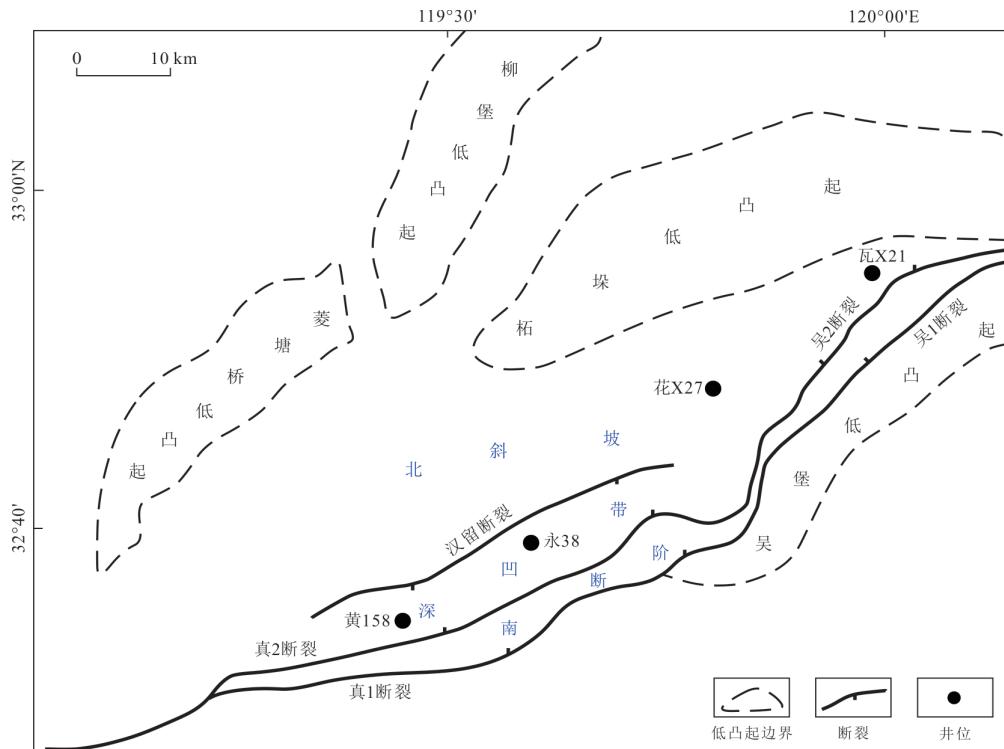


图2 高邮凹陷构造单元划分

Fig. 2 The map of the structural unit division Gaoyou sag

图中显示了本文所用钻井位置

gen, 2012). 但对于陆相断陷盆地, 能否直接采用MTM频谱分析方法, 前人进行了大量试验(吴怀春等, 2008; Liu et al., 2018; Xu et al., 2019), 结论是基本可行。选择层序齐全的深湖亚相GR曲线是能够反映沉积环境和气候旋回性演变的。

考虑隆起和盆缘地层剥蚀以及断层造成地层缺失或重复情况, 本研究选取自然伽马测井曲线井号的原则是: 一是尽量选择在洼陷中央部位; 二是避免选择地层缺失或重复井, 若存在此情况, 就采取不同井段拼接的方法。为此, 我们经过大量测井曲线筛选, 选取了洼陷中央的永38井、花X27井和瓦X21井的GR曲线(图2)。其中, 东台组~戴南组为永38井GR曲线, 阜宁组阜二段~阜四段为花X27井GR曲线, 阜宁组阜一段为瓦X21井GR曲线(表1)。

由于高邮凹陷三垛组顶界遭受了很大的剥蚀, 其顶界年龄是难以确定的。根据前人研究, 阜宁组与泰州组在高邮凹陷中央部位为整合接触(陈安定, 2010), 二者的界线即为古近系与白垩系的分界(图1), 所以, 根据最新的国际地质年代表, 将阜宁组底界年龄定为66.0 Ma, 并以此为锚点向上进行定量旋回地层分析。

2 定量旋回地层分析

米兰科维奇理论(天文旋回理论)是20世纪地球科学的最大亮点之一。地球轨道周期是迄今为止地球演变历史中唯一可以确切的定量参数, 其中, 偏心率、斜率和岁差分别对应着不同的周期或频率。通过对高分辨率的旋回地层记录进行天文调谐来建立天文年代标尺, 即可获得各界面的绝对地质年龄(Laskar et al., 2004; 吴欣松等, 2011; 黄春菊, 2014; Xu et al., 2019)。定量旋回地层学分析基本流程如图3所示。前人对高邮凹陷新生代地层界线年龄存在较大争议, 且不统一(图1)。为此, 本文开展此项研究, 旨在运用定量旋回地层学的分析结果来厘定新生代各组地层界线年龄。本次旋回分析的所有操作在Aycle软件中进行。

2.1 深度域旋回分析

以相似的沉积环境和相同的构造背景为前提, 将研究时段分为A、B、C和D等4个部分(表1)。其中, A段(1 138~2 460 m, 三垛组, 永38井), B段(2 460~3 860 m, 戴南组, 永38井), C段(2 348.7~3 254 m, 阜四段~阜二段, 花X27井), D段(2 694.4~3 216.1 m, 阜一段, 瓦X21井)。对研究层

表 1 高邮凹陷定量旋回地层分析自然伽马曲线选取井段

Table 1 Selections of natural gamma ray (GR) curve intervals for cyclostratigraphy analysis in Gaoyou sag

序号	层位	井号	底界年龄(Ma) (本次研究)	底界年龄(Ma) (陈安定,2010)	深度段 (m)	GR 分段
1	东台组	Qd	永 38	2.0	2.6	0~143
2	盐二段	N ₁ y ²	永 38	11.3	11.0	143~477
3	盐一段	N ₁ y ¹	永 38	23.03	23.5	477~1 138
4	垛三段	剥蚀		34.0	33.7~37.0	
5	垛二段	E ₂ s ²	永 38			
6	垛一段	E ₂ s ¹		43.3	41.0	1 138~2 460 A
7	戴二段	E ₂ d ²	永 38			2 460~3 095 B
8	戴一段	E ₂ d ¹		50.5	53.0	3 095~3 860
9	阜四段	E ₁ f ⁴				
10	阜三段	E ₁ f ³	花 X27			2 348.7~3 254 C
11	阜二段	E ₁ f ²		56.5	59.0	
12	阜一段	E ₁ f ¹	瓦 X21	66.0	65.0	2 694.4~3 216.1 D
13	泰二段	K ₂ t ²				
14	泰一段	K ₂ t ¹				

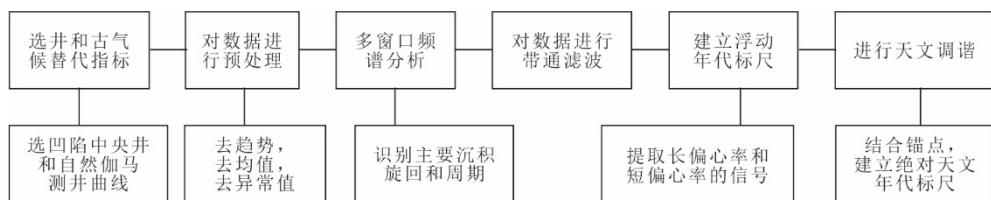


图 3 定量旋回分析学分析基本流程

Fig. 3 The essential flow chart for quantitative cyclostratigraphy analysis

段 GR 曲线数据序列预白化处理,去除加权平均趋勢值,得到剩余值序列;接着对该剩余值进行多窗谱频谱分析方法(MTM)进行分析。如图 4 所示,A 段沉积序列存在 66.7 m、16.7 m 旋回周期,根据前人研究推算大概的沉积速率(0.146 8 m/ka)(陈安定,2010),405 ka 旋回对应的厚度可能为 $405 \times 0.1468 = 59.49$ m,同理,100 ka 旋回对应的厚度可能为 14.68 m。据此认为,深度域的 MTM 频谱图显示的 66.7 m 旋回的沉积持续时间为 405 ka(长偏心率周期),16.7 m 旋回的沉积持续时间为~100 ka(短偏心率周期)。同理,对剩下的 B、C 和 D 段深度域进行分析,识别出 405 ka 周期和~100 ka 对应的旋回深度。405 ka 周期对应的 A、B、C、D 段中心频率为 0.014 993、0.012 005、0.014 993 和 0.040 000,带宽分别为 0.003 748、0.003 001、0.003 748、0.010 000;~100 ka 对应的中心频率为 0.059 880、0.048 077、0.059 880 和 0.158 730,带宽为 0.014 970、0.012 019、0.014 970 和 0.039 683。

2.2 时间域旋回分析

前人研究认为,长偏心率周期(405 ka)稳定并可能持续到 250 Ma,因此,405 ka 可作为旋回地层分析天文调谐的主要周期(Hinnov and Hilgen, 2012)。

对研究时段总 GR 曲线数据剩余值序列进行 405 ka 周期调谐,获得了时间域的数据序列,并对其进行 MTM 频谱分析。如图 5 所示,405 ka 长偏心率周期和~100 ka 短偏心率周期比较突出,同时置信度超过 99%,认为可信度非常高(图 5b、5c)。对比 37.5~66 Ma 时间段 La2010 理论 ETP(偏心率、斜率、岁差)频谱图(图 5d),即通常的长偏心率周期是 405 ka,短偏心率是 131 ka、125 ka、100 ka、95 ka、斜率 43 ka、39 ka,岁差是 23 ka、22 ka、18.8 ka,可知本研究所建立的天文年代浮动标尺(图 5a)是可靠的。

2.3 绝对天文旋回年代标尺的建立

根据前文建立的浮动天文年代标尺和锚点,建立其高邮凹陷古近纪绝对天文年代标

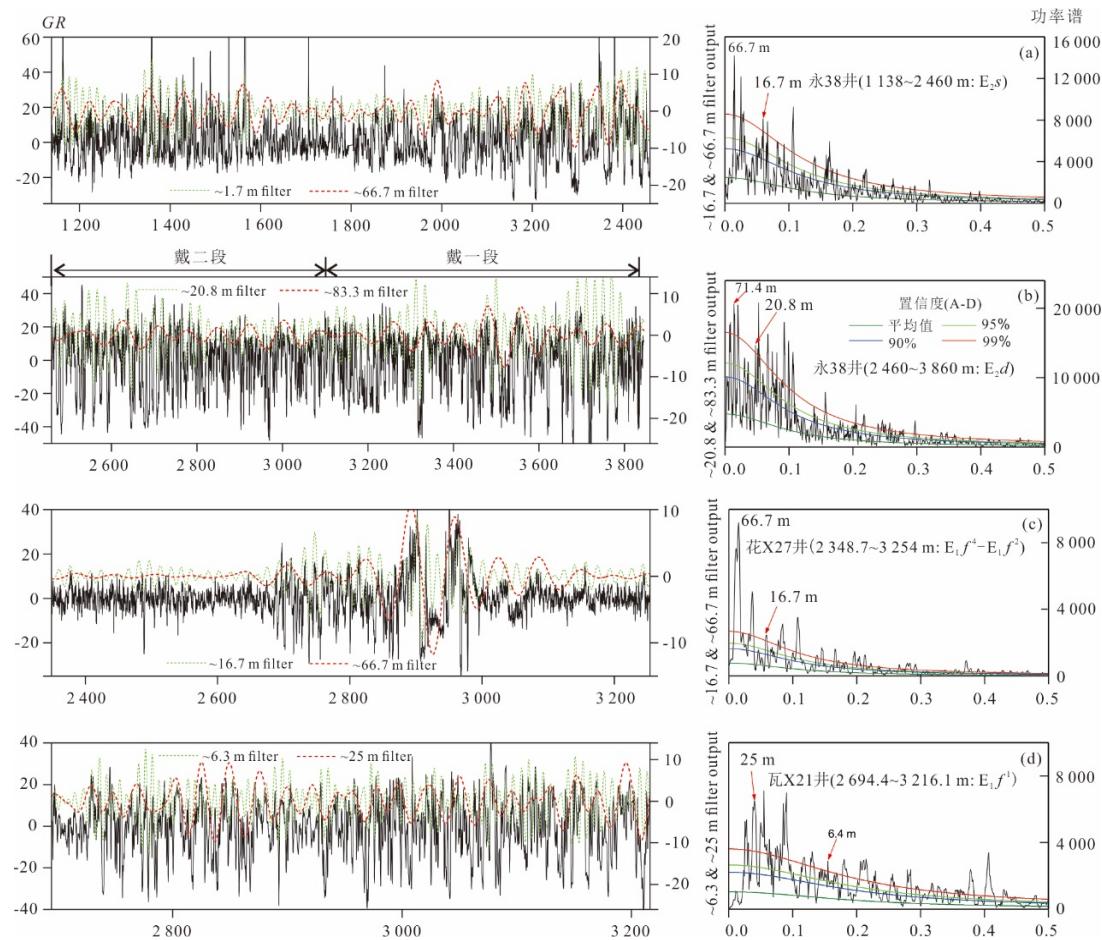


图4 高邮凹陷古近系深度域GR数据序列的旋回综合分析图

Fig. 4 Cyclostratigraphy for GR data series of the Paleogene succession of the Gaoyou sag in depth domain

尺(图6).由此确定高邮凹陷三垛组顶界年龄为34.0 Ma,底界年龄为43.3 Ma;戴南组底界年龄为50.5 Ma;阜二段底界年龄为56.5 Ma;阜一段底界年龄为66.0 Ma.

与前人年代地层划分相比,存在以下几点差异(图1):(1)将古近系底界面年龄统一为66.0 Ma(吴欣松等,2011);(2)阜二段底界年龄(56.5 Ma)比前人方案都年轻了3.5~4.0 Ma;(3)戴南组底界年龄(吴堡事件)为50.5 Ma,与中国东部其他新生代沉积盆地一致;(4)三垛组底界年龄(真武事件)为43.3 Ma,比前人方案也年轻了2.7~7.2 Ma;(5)三垛组顶界年龄(三垛运动)为34.0 Ma,这比前人方案年轻了3~4 Ma;(6)中新世底界年龄统一为23.03 Ma(Laskar *et al.*, 2004; 黄春菊, 2014; Xu *et al.*, 2019).

2.4 顺层同向生长纤维状方解石U-Pb年龄锚点检验

为了检验上述建立起来的高邮凹陷古近纪

绝对天文年代标尺是否可靠,在以阜宁组底界为计算锚点的起始点进行计算,并与国际标准曲线(即La2010d标准曲线)进行比对的基础上,通过方解石纹层定年的数据进行约束.本次采集了高邮凹陷黄158井(图2)3187.65 m深度(阜四段)页岩中的一块纹层方解石(图7a),在澳大利亚昆士兰大学地球与环境科学学院开展超低浓度U-Pb定年.在定年之前,对该纹层方解石进行了详细的岩石学观察、O-C同位素和包裹体分析,以确认该纹层方解石是否为沉积-早成岩阶段的产物.也就是说,其U-Pb年龄是否能够近似代表其沉积年龄.

场发射扫描电镜(图7b)和微区能谱(图7c)证实这种白色的顺层脉矿物组成为方解石.薄片透射光下观察到这种方解石脉为共轴同向生长,且发育中间缝合线(图7d)(Cobbold and Rodrigues, 2007; Bons *et al.*, 2012; Cobbold *et al.*, 2013);阴极发光观察发深黄色的一期方解石脉,运用微钻采集顺层方

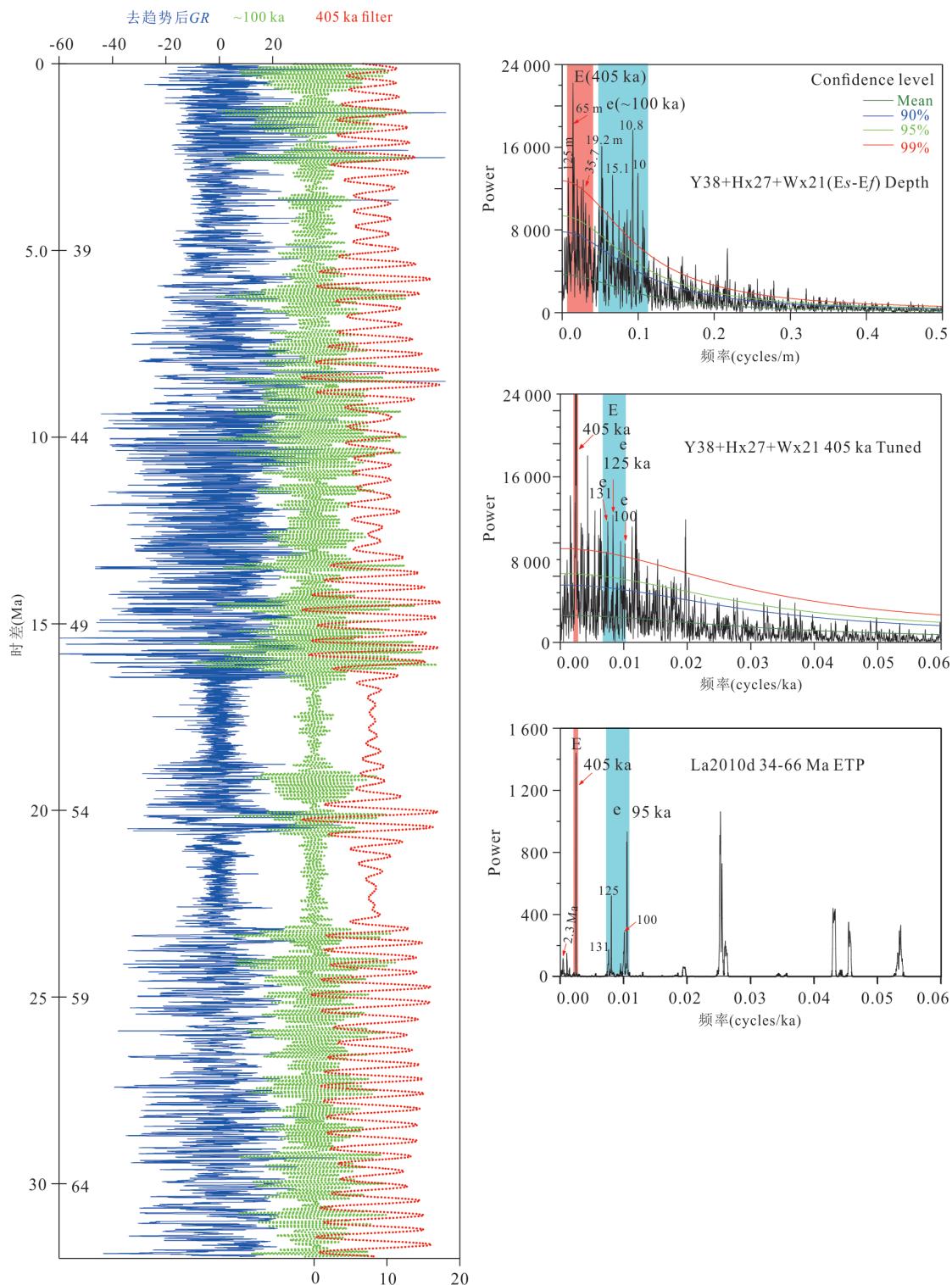


图 5 高邮凹陷古近系浮动年代标尺与总 GR 序列深度域、时间域及 ETP 综合对比 (Laskar *et al.*, 2011)

Fig. 5 Floating time scale for the Paleogene succession of the Gaoyou sag, the composite GR depth-series, the composite GR time-series and Earth's orbital parameters from 66.0 to 34.0 Ma presented in ETP format according to the La2010d model (Laskar *et al.*, 2011)

解石脉样品(图 7e)进行稳定 O、C 同位素组成分析, $\delta^{13}\text{C}=5.22\text{\textperthousand}$ PDB, $\delta^{18}\text{O}=-8.47\text{\textperthousand}$ PDB; 透射光观察方解石脉中单一液相盐水包裹体, 直径多小于

$1\text{ }\mu\text{m}$, 形成温度 $<50\sim60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 7f); 荧光观察中间缝合线带发育第一期发火红色荧光低熟油原生包裹体, 而切穿方解石脉的剪切裂纹中捕获发蓝绿

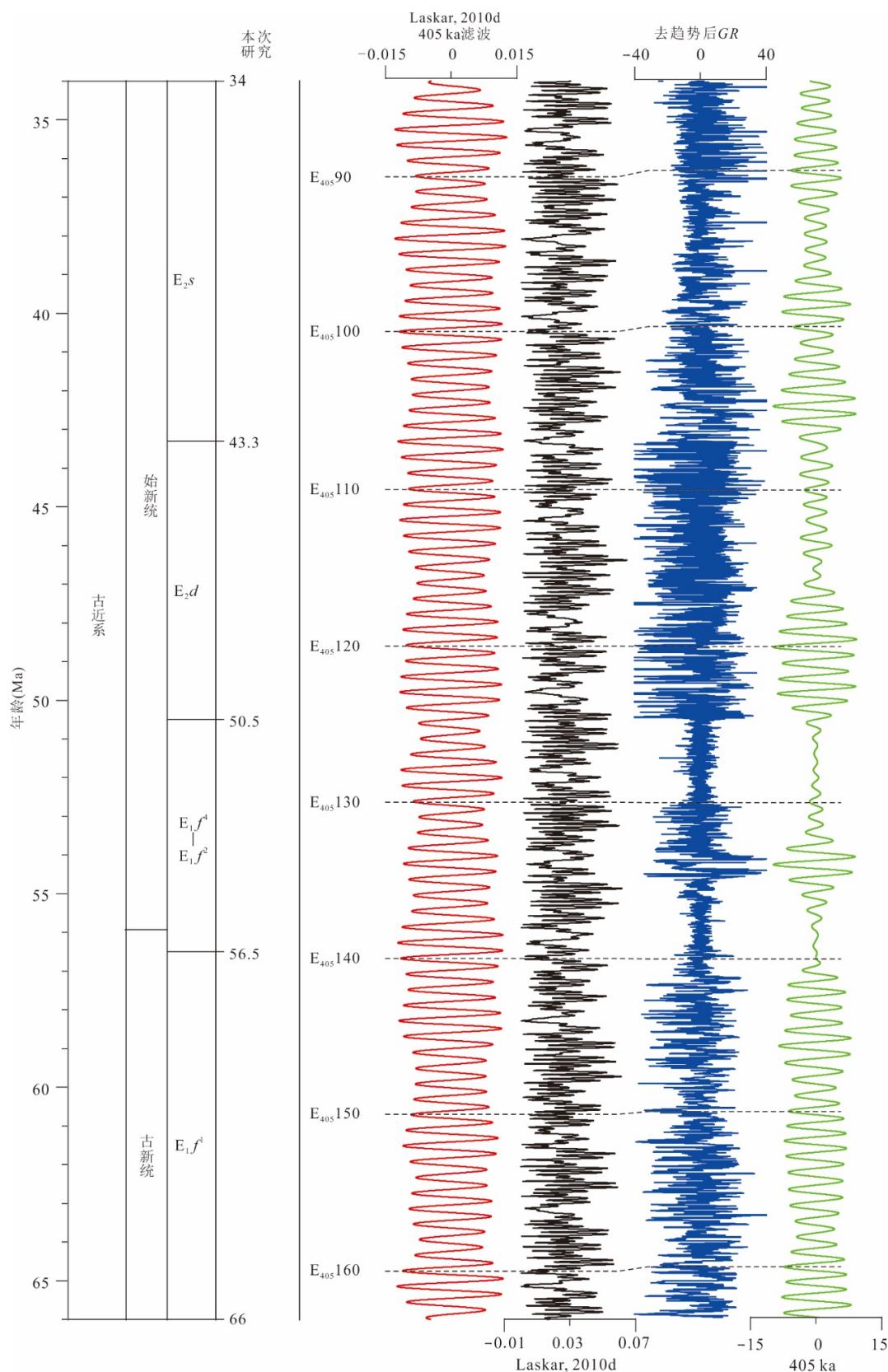
图6 高邮凹陷古近系绝对年代标尺与总GR序列及La2010理论偏心率曲线(Laskar *et al.*, 2011)的综合对比

Fig. 6 Astronomical time scale (ATS) for the Paleogene succession of the Gaoyou sag. It includes the eccentricity of the La2010d astronomical models, the 405 ka filters of La2010d eccentricity, the composite GR time-series of our study, and the ~405 ka filters of the GR time-series (Laskar *et al.*, 2011)

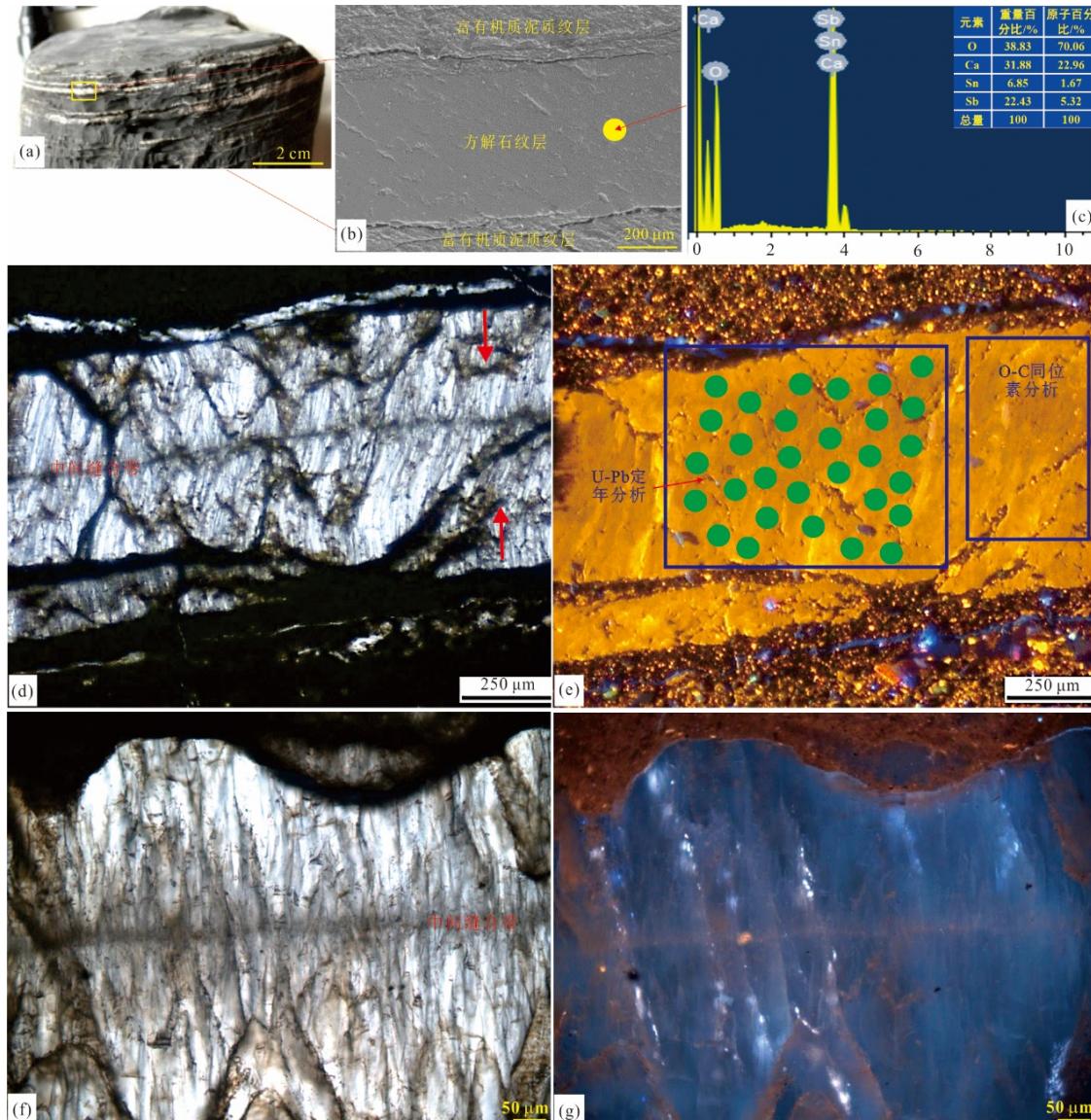


图 7 黄 158 井 3 187.65 m(阜宁组阜四段)页岩中顺层同向生长纤维状方解石脉岩石学观测

Fig. 7 Petrographic observation of bedding-parallel syntaxial growth fibrous calcite veins in the shale succession at depth of 3 187.65 m of Well Huang 158 (the Fourth Member of Funing Formation, E_4f^4)

a. 1~3 mm 厚顺层方解石脉心照片; b. 场发射扫描电镜照片显示和富有机质粘土纹层中发育的顺层方解石脉(a); b~c. 照片黄色圆点位置能谱分析证实脉体为方解石矿物; d. 顺层同向生长纤维方解石脉透射光照片, 发育中间缝合线, 红色箭头指示生长方向; e, d. 同一视域阴极发光照片, 绿色点区域为方解石超低浓度 U-Pb 定年激光剥蚀点; 另一区域为微钻取样方解石 O-C 同位素组成分析; f. 顺层同向生长纤维状方解石脉透射光照片, 发育中间缝合线; g, f. 同一视域的荧光照片显示中间缝合线带发育第一期发火红色荧光低熟油原生包裹体, 而切穿方解石脉的剪切裂纹中捕获发蓝绿色荧光的较高成熟度次生油包裹体

色荧光的较高成熟度次生油包裹体(图 7g). 由此可断定, 该顺层同向生长纤维状方解石脉形成深度小于几十~几百米(Al-Aasm *et al.*, 1992; Hillier and Cosgrove, 2002). 也就是说, 该顺层方解石脉形成于沉积-早成岩阶段. 因此, 其超低浓度 U-Pb 定年的年龄可以近似地代表其地层年龄.

为此, 对该顺层方解石脉(图 7e)进行超低浓度

U-Pb 定年(U 含量低于 10^{-6})分析结果为 53.1 ± 3.7 Ma(图 8). 以此年龄作为一个新的锚点, 来检验前文建立起来的绝对天文年代标尺(图 6)是否可靠.

以黄 158 井 3 187.65 m(阜四段)顺层方解石脉激光原位方解石 U-Pb 年龄 53.1 ± 3.7 Ma 为锚点, 计算得出, 黄 158 井戴二段(E_2d^2)底界年龄为 51.55 ± 3.7 Ma, 顶界年龄为 47.73 ± 3.7 Ma, 持

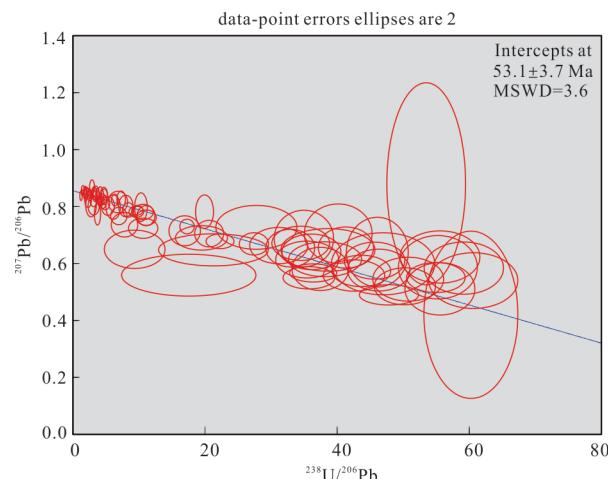


图8 黄158井3 187.65 m(阜宁组阜四段)顺层方解石脉激光原位方解石U-Pb定年

Fig. 8 The U-Pb dating by laser ablation in-situ of bedding-parallel syntaxial fibrous calcite vein at depth of 3 187.65 m (E_4^A) of Well Huang 158
激光原位剥蚀位置见图7e

续时间为3.82 Ma(图9).这与前文的 E_2d^2 底界年龄为50.5 Ma(图6)是极为接近的.

永38井戴二段钻井未钻穿.戴一段厚度765 m,与黄158井戴一段799 m厚度相近,且计算得出永38井戴二段(E_2d_2)顶界年龄为47.2 Ma,与黄158井戴二段顶界年龄47.73±3.7 Ma极为接近.因此,可用黄158井年龄为锚点,对永38井戴一段进行分析:永38井戴一段底界

年龄为47.73±3.7 Ma,顶界年龄为42.34±3.7 Ma,持续时间为5.39 Ma.戴一段顶界年龄(42.34±3.7 Ma)即为三垛组的底界年龄,与前文的 E_2s^1 底界年龄为43.3 Ma(图6)也是极为接近的.

以三垛组底界(E_2s^1)年龄为42.34±3.7 Ma,同理计算得出,永38井三垛组顶界年龄为34.06±3.7 Ma,持续时间为8.28 Ma.这与前文的 E_2s^1 顶界年龄为34.0 Ma(图6)几乎完全一致.

由此证明了前文建立的绝对天文年代标尺(图6)是较为可靠的;同时,厘定了三垛运动对高邮凹陷影响的时限.鉴于三垛组为剥蚀残留地层,从隆起→斜坡→洼陷保留下来的地层是不同的,洼陷保留地层相对多一些;换句话说,洼陷抬升遭受剥蚀时间应该是最晚的.而位于洼陷的永38井残留地层持续时间达8.08 Ma,抬升剥蚀起始年龄为34.06 Ma,结束年龄为23.03 Ma,剥蚀时限为(34.06→23.03 Ma)11.03 Ma.而隆起和斜坡带开始剥蚀的时间要早于34.06 Ma,剥蚀的时限会更长一些.

3 讨论

沉积盆地主要界面(譬如,角度不整合)通常是构造运动的响应.前人大量研究成果表明,中国东部晚-中生代至新生代裂陷成盆主要与太平洋板块早期NNW向俯冲,后期转为NWW向俯冲的动力学环境有关(Maruyama *et al.*, 1997; 李三忠等,

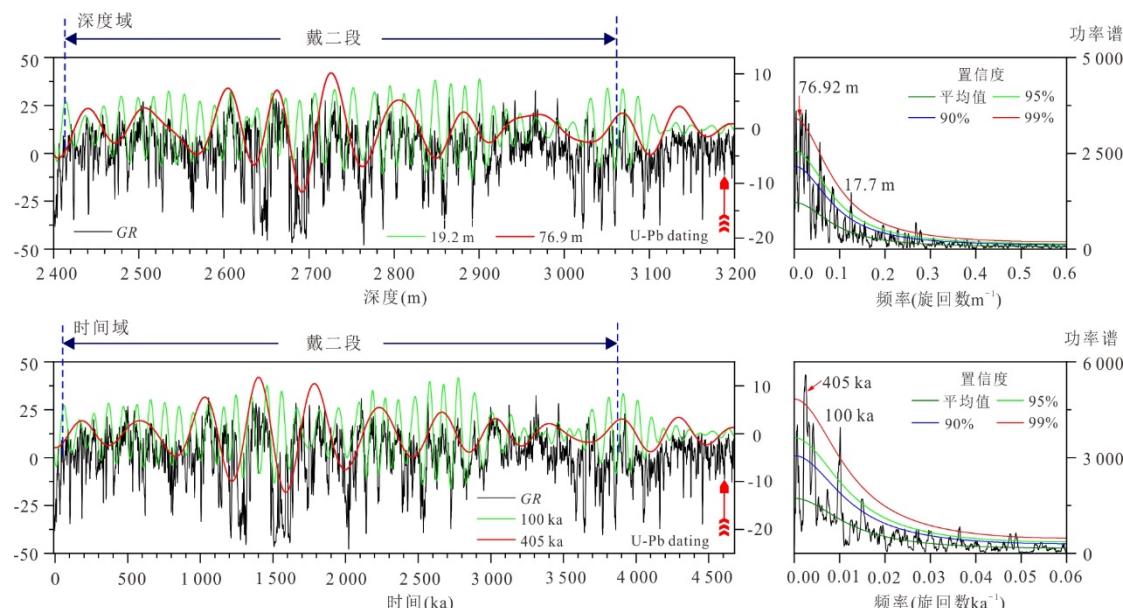


图9 黄158井戴二段深度域和时间域GR数据序列的旋回综合分析图

Fig. 9 Cyclostratigraphy for GR data series of E_2d^1 of Well Huang 158 both in depth domain and time domain

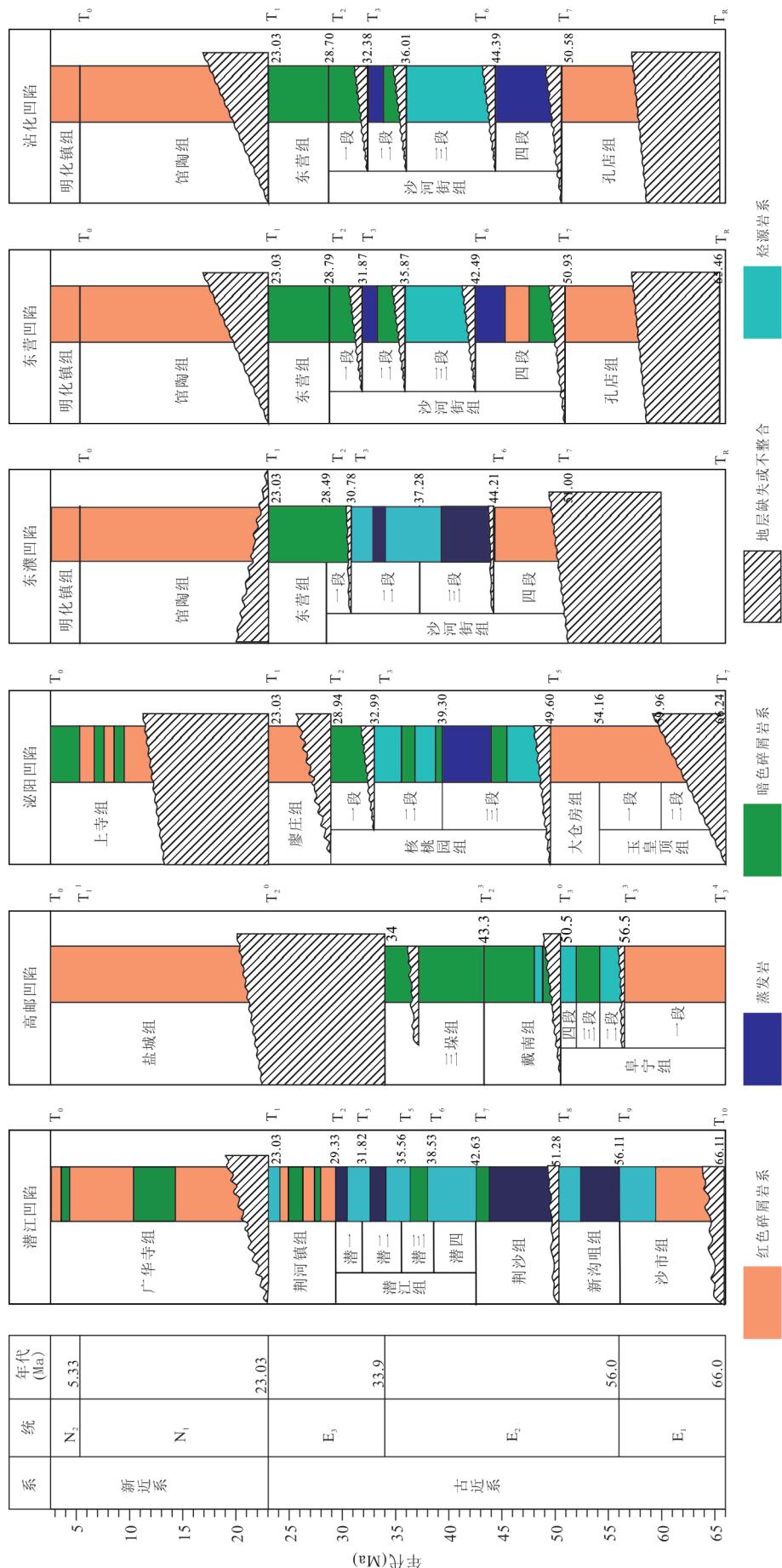


Fig.10 Comparison diagram of the main stratigraphic boundaries for typical Cenozoic faulted sag in the East China continent
图10 中国东部陆上典型新生代断陷盆地主要界面对比图

2011; Liu *et al.*, 2017). 太平洋板块漂移方向发生约 45°逆时针旋转, 从向 NNW 漂移转为向 NWW 漂移的主要证据是皇帝岛链到夏威夷岛链的走向转折 (Hawaii-Emperor Bend, HEB) (周蒂和孙珍, 2017)。过去根据对转折处海山样品进行 K-Ar 测年或全岩 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 全熔测年结果认为是 42.5 Ma (Engelbretson *et al.*, 1984); 本世纪以来采用更先进的宽束激光 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法对其火山岩中的长石和角闪石进行单矿物测年, 获得 HEB 开始时间为 50±0.9 Ma, 持续了约 8 Ma (Sharp and Clague, 2006); 二者年龄相差了约 7.5 Ma。印度板块与欧亚板块全面碰撞也发生于约 50 Ma (Yin and Harrison, 2000)。因此, 结合前文建立的绝对天文旋回年代标尺, 50 Ma±太平洋板块、欧亚板块和印度板块相互作用, 在中国东部成盆的构造响应突出表现为: 平面上, 晚白垩世十始新世早期 (~50 Ma) 以 NE~SW 向拉张为主; 始新世中期十渐新世 (50.00~23.03 Ma) 以 NW~SE 拉张为主。剖面上, 形成了始新世中期的“裂陷构造变革面”, 其在高邮凹陷就是戴南组 (E_2d) 底界面 (50.5 Ma)。

随着太平洋板块向欧亚板块俯冲的板片角度变陡, 造成中国东部 NW~SE 伸展沉积中心自西向东迁移, 于 23.03 Ma 结束了中国东部陆上的新生代盆地裂陷历史而进入裂后热沉降阶段 (孙肇才, 2004; Seton *et al.*, 2015; Liu *et al.*, 2017)。据此, 我们可获得如下认识:

(1) 太平洋板块俯冲转向 (~50 Ma) 和俯冲板片倾角变陡 (~23.03 Ma), 在中国东部形成“二元”裂陷结构: (i) 晚白垩世十始新世 (~50 Ma) NE~SW 向早期裂陷; (ii) 始新世中期十渐新世 (50~23.03 Ma) NW~SE 向晚期裂陷。

(2) ~50 Ma 和 ~23.03 Ma 这两个界面可进行跨盆地区域性对比 (图 10)。

然而, 位于下扬子地台北缘、郯庐断裂带东侧的苏北盆地, 在第二幕裂陷之后, 于始新世晚期就开始抬升 (三垛运动) (洼陷于 34.06 Ma 开始抬升, 隆起和斜坡抬升时间可能更早一些), 使得整个渐新世缺失而与其他盆地 (凹陷) 差异极大 (图 10)。前人认为可能与扬子地台与华北地台的深部过程差异有关 (李三忠等, 2011); 区域上, 苏北盆地的三垛运动与盆地南面的第三次“江南隆起” (38 Ma) (陈安定等, 2004) 和北面的苏鲁造山带隆升 (邱海峻等, 2006) 是相关联的。因此, 笔者认为这正反映了

印度板块与欧亚板块碰撞, 在华南陆块总体表现以挤压为主而缺乏 NE 向深部幔隆的远距离效应。

4 结论

页岩层系中发育的顺层纤维状方解石脉超低浓度 U-Pb 定年结果不仅为沉积盆地定量旋回地层学分析提供了很好的锚点约束, 据其建立的年代地层学框架为更加准确的埋藏史-热史-生烃史模拟和油气成藏过程分析奠定了基础。它是一个很有应用潜力的研究领域。通过顺层方解石 U-Pb 定年对高邮凹陷古近系定量旋回地层分析的约束, 获得如下结论:

(1) 苏北盆地高邮凹陷 ~50 Ma 界面是太平洋板块俯冲转向和印度板块与欧亚板块碰撞的构造响应, 也是“二元”裂陷的时间分界点; ~23.03 Ma 是凹陷破裂不整合面。这两个时间界面在中国东部晚白垩世~新生代沉积盆地是可以对比的。

(2) 与中国东部其他新生代凹陷/盆地不同的是, 高邮凹陷在始新世晚期就开始抬升, 裂陷结束的时间早, 缺失渐新世; 在沉积中心的洼陷处自 34.06 Ma 开始抬升遭受剥蚀, 历经 11.03 Ma, 隆起和斜坡带开始剥蚀的时间更早, 剥蚀的时限会更长。

References

- Al-Aasm, I.S., Muir, I., Morad, S., 1992. Diagenetic Conditions of Fibrous Calcite Vein Formation in Black Shales: Petrographic, Chemical and Isotopic Evidence. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 41(1): 46–56.
- Bons, P.D., Elburg, M.A., Gomez-Rivas, E., 2012. A Review of the Formation of Tectonic Veins and Their Microstructures. *Journal of Structural Geology*, 43: 33–62.
- Chen, A.D., 2010. Tectonic Features of the Subei Basin and the Forming Mechanism of Its Dustpan-Shaped Fault Depression. *Oil & Gas Geology*, 31(2): 140–150 (in Chinese with English abstract).
- Chen, A.D., Guo, T.L., Wan, J.L., 2004. Study on the Tectonic Uplift of the Peripheral Upheaval in Jiangsu and Anhui by Using Fission Track and Isotopes Dating Methods. *Geotectonica et Metallogenica*, 28(4): 379–387 (in Chinese with English abstract).
- Chen, A.D., Tang, Y., 2007. A Study on the Geothermal and Burial History of Subei Basin and Its Enlightenments on Petroleum Exploration in South Basin, the

- Southern Yellow Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 19(4): 234—239 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y.F., Yan, Q.S., Xu, S.Y., 1993. Evolution of the Sedimentary Environments in North Jiangsu Basin and Its Tectonic Setting. *Acta Geologica Sinica*, 28(2): 151—160 (in Chinese with English abstract).
- Cobbold, P.R., Rodrigues, N., 2007. Seepage Forces, Important Factors in the Formation of Horizontal Hydraulic Fractures and Bedding-Parallel Fibrous Veins ('Beef' and 'Cone-in-Cone'). *Geofluids*, 7: 313—322.
- Cobbold, P.R., Zanella, A., Rodrigues, N., et al., 2013. Bedding-Parallel Fibrous Veins (Beef and Cone-in-Cone): Worldwide Occurrence and Possible Significance in Terms of Fluid Overpressure, Hydrocarbon Generation and Mineralization. *Marine and Petroleum Geology*, 43: 1—20.
- Deng, H., Tang, Y., Luo, Z.H., et al., 2021. Petrology and Isotopic Chronology of Tagong Pluton on the Eastern Margin of Songpan-Ganzi Orogenic Belt and Its Tectonic Significance. *Earth Science*, 46(2): 527—539 (in Chinese with English abstract).
- Deng, L.J., Xia, L.J., Zhang, L.P., et al., 2009. The Exploration Methods Research of Subtle Reservoir in North Jiangsu Basin—Taking Gaoyou Depression for Example. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2(1): 14—19 (in Chinese with English abstract).
- Engebretson, D.C., Cox, A., Gordon, R.G., 1984. Relative Motions between Oceanic Plates of the Pacific Basin. *Journal of Geophysical Research*, 89(NB12): 291—310.
- Gradstein, F.M., Ogg, J.G., Hilgen, F.J., 2012. The Geologic Time Scale. *Newsletters on Stratigraphy*, 45(2): 171—188.
- Guan, S.Z., 1986. Discovery of the Genus *Pinnocypris* Zhou (Ostracoda) in the Early Tertiary Salt-Bearing Strata of Hunan Province and Stratigraphic Division and Correlation of Eocene. *Geological Review*, 32(1): 8—15 (in Chinese with English abstract).
- Guo, T.D., Zheng, C.Q., Zhou, X.W., et al., 2021. Metamorphic Evolution and Geological Significance of Plagioclase Amphibolite in Songyang Area, Southwest Zhejiang Province. *Earth Science*, 46(2): 489—503 (in Chinese with English abstract).
- Hillier, R.D., Cosgrove, J.W., 2002. Core and Seismic Observations of Overpressure-Related Deformation within Eocene Sediments of the Outer Moray Firth, UKCS. *Petroleum Geoscience*, 8: 141—149.
- Hinnov, L.A., Hilgen, F.J., 2012. Cyclostratigraphy and Astrochronology. In: Gradstein, F. M., Ogg, J. G., Schmitz, M., et al., eds., *The Geologic Time Scale* 2012. Elsevier, Amsterdam, 63—83.
- Hu, X.C., 2010. On the Age and Origin of the Intrusive Rocks in Gaoyou Depression of North Jiangsu Basin. *Journal of Stratigraphy*, 34(3): 293—297 (in Chinese with English abstract).
- Huang, C.J., 2014. The Current Status of Cyclostratigraphy and Astrochronology in the Mesozoic. *Earth Science Frontiers*, 21(2): 48—66 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C.Z., Shi, Y.S., Guo, L.Z., et al., 1988. *Palte Tectonic*. Nanjing University Press, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M., et al., 2011. La2010: A New Orbital Solution for the Long-Term Motion of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 532(A89): 17.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., et al., 2004. A Long-Term Numerical Solution for the Insolation Quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 428(1): 261—285.
- Li, R.F., Chen, L.Q., Li, Y.J., et al., 2010. The Thermal History Reconstruction and Hydrocarbon Accumulation Period Discrimination of Gaoyou Depression in Subei Basin. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 151—159 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Zhang, G.W., Zhou, L.H., et al., 2011. The Opposite Meso-Cenozoic Intracontinental Deformations under the Superconvergence: Rifting and Extension in the North China Craton and Shortening and Thrusting in the South China Craton. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 79—107 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X., Zhao, D.P., Li, S.Z., et al., 2017. Age of the Subducting Pacific Slab beneath East Asia and Its Geodynamic Implications. *Earth and Planetary Science Letters*, 464: 166—174.
- Liu, Z.H., Huang, C.J., Thomas, J.A., et al., 2018. High-Resolution Astrochronological Record for the Paleocene-Oligocene (66—23 Ma) from the Rapidly Subsiding Bohai Bay Basin, Northeastern China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 510:78—92.
- Maruyama, S., Isozaki, Y., Kimura, G., et al., 1997. Paleogeographic Maps of the Japanese Islands: Plate Tectonic Synthesis from 750 Ma to the Present. *Island Arc*, 6(1): 121—142.
- Neng, Y., Yang, Q., Zhang, K.X., et al., 2009. Tectonic Subsidence and Evolution of the Gaoyou Depression in Northern Jiangsu Basin during the Late Cretaceous to the Cenozoic. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 29(2): 25—32 (in Chinese with English abstract).

- Qian, J., 2000. Formation and Distribution of Oil and Gas Fields in Subei Basin. *Journal of the University of Petroleum*, 24(4): 21—25 (in Chinese with English abstract).
- Qian, J., 2001. Oil and Gas Fields Formation and Distribution of Subei Basin—Research Compared to Bohai Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 22(3): 12—16 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, H.J., Xu, Z.Q., Qiao, D.W., 2006. Progress in the Study of the Tectonic Evolution of the Subei Basin, Jiangsu, China. *Geological Bulletin of China*, 25(9—10): 1117—1120 (in Chinese with English abstract).
- Seton, M., Flament, N., Whittaker, J., et al., 2015. Ridge Subduction Sparked Reorganization of the Pacific Plate-Mantle System 60—50 Million Years Ago. *Geophysical Research Letters*, 42(6): 1732—1740.
- Sharp, W. D., Clague, D. A., 2006. 50 - Ma Initiation of Hawaiian - Emperor Bend Records Major Change in Pacific Plate Motion. *Science*, 313(5791): 1281—1284.
- Sun, Z.C., 2004. Rethinking about the Tectonic Evolution of the Cenozoic Continental Marginal Basin of the West Pacific Ocean in Accordance with Some Important Advances of Studies of Petroleum Geology in East China Sea—An Evolutionary Model of Residual Back Arc Basins Developed in the Location of Trenches Retreating towards the Ocean. *Petroleum Geology & Experiment*, 26(2): 121—137 (in Chinese with English abstract).
- Wang, H.F., 2016. Recognition of Effective Fractures within the Oil Shale in the Fourth Member of Funing Formation in Northern Jiangsu Basin. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 38(3): 21—27 (in Chinese with English abstract).
- 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, L.R., 1984. The Mesozoic-Cenozoic Igneous in East China and Adjacent Area. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Wu, X.S., Guo, J.J., Huang, Y.J., et al., 2011. Well Logging Proxy of the Late Cretaceous Palaeoclimate Change in Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography*, 13(1): 103—110 (in Chinese with English abstract).
- Wu, X.Y., Mou, R., Shi, S.Q., et al., 1999. Relationship between Volcanic Rocks and Structural Evolution in Subei Basin. *China Petroleum Exploration*, 4(1): 44—47 (in Chinese with English abstract).
- Xu, C., Kuang, G.X., Zeng, L., et al., 2019. Original Depth of Paleoproterozoic Carbonatites in North China Craton and Onset of Modern-Style Plate Tectonics. *Earth Science*, 44(4): 1083—1095 (in Chinese with English abstract).
- Xu, K., Chen, H.H., Huang, C.J., et al., 2019. Astronomical Time Scale of the Paleogene Lacustrine Paleoclimate Record from the Nanxiang Basin, Central China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 532: 109253.
- Xu, T.W., Wang, Y.M., Wei, S.J., et al., 2008. Recovery of Erosion Thickness of the Eocene Sanduo Movement in Subei Basin. *Journal of Oil and Gas Technology*, 30(6): 56—60 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z.Q., Wang, Q., Li, Z.H., et al., 2016. Indo-Asian Collision: Tectonic Transition from Compression to Strike Slip. *Acta Geologica Sinica*, 90(1): 1—23 (in Chinese with English abstract).
- Yao, H.F., Hou, J.G., Lin, C.Y., et al., 2005. A Study on Paleotemperature and Thermal History in Multicycle Evolution Basin: Taking North Jiangsu Basin as Example. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 35(2): 195—199 (in Chinese with English abstract).
- Yin, A., Harrison, T.M., 2000. Geologic Evolution of the Himalayan Tibetan Orogeny. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1): 211—280.
- Ying, Y.X., Liu, H.Y., Wang, Z.Y., 2022. Reworking of the Juvenile Crust in the Late Mesozoic in North Qinling, Central China. *Journal of Earth Science*, 33(3): 623—641. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1521-0>
- Zhang, P., Zhou, Z.Y., Xu, C.H., 2009. Thermo-Tectonic History of the Lower Yangtze Area since Late Cretaceous: Evidence from Apatite Fission Track Analysis of Sandstones from Pukou Formation. *Offshore Oil*, (4): 26—32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.L., Zhu, X.M., Zhong, D.K. et al., 2004. The Character of Sequence Framework of Tertiary and Upper Cretaceous in Gaoyou Sag, Subei Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(3): 393—399 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H.W., Li, T.D., He, R.Z., 2020. Southeastward Subduction of North China Block: Insights from Tomographic Image of the Middle and Lower Yangtze River Metallogenic Belt. *Earth Science*, 45(11): 4187—4197 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, D., Sun, Z., 2017. Plate Evolution in the Pacific Domain since Late Mesozoic and Its Inspiration to Tectonic Research of East Asia Margin. *Journal of*

Tropical Oceanography, 36(3): 1—19 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈安定, 2010. 苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理. 石油与天然气地质, 31(2): 140—150.
- 陈安定, 郭彤楼, 万景林, 2004. 裂变径迹、同位素年龄研究苏皖周边隆起构造抬升. 大地构造与成矿学, 28(4): 379—387.
- 陈安定, 唐焰, 2007. 苏北盆地热史、埋藏史研究及其对南黄海南部盆地油气勘探的启示. 中国海上油气, 19(4): 234—239.
- 陈友飞, 严钦尚, 许世远, 1993. 苏北盆地沉积环境演变及其构造背景. 地质科学, 28(2): 151—160.
- 邓红, 唐渊, 骆志红, 等, 2021. 松潘—甘孜造山带东缘塔公岩体岩石学、同位素年代学特征及其构造意义. 地球科学, 46(2): 527—539.
- 邓丽娟, 夏连军, 张列平, 等, 2009. 苏北盆地隐蔽油气藏勘探方法探讨——以高邮凹陷为例. 复杂油气藏, 2(1): 14—19.
- 关绍曾, 1986. 鳍星介在湖南早第三纪含盐系地层中的发现及始新统的划分与对比. 地质论评, 32(1): 8—15.
- 郭腾达, 郑常青, 周喜文, 等, 2021. 浙西南松阳地区斜长角闪岩变质作用演化及地质意义. 地球科学, 46(2): 489—503.
- 胡晓春, 2010. 苏北盆地高邮凹陷侵入岩形成时期及成因机制探讨. 地层学杂志, 34(3): 293—297.
- 黄春菊, 2014. 旋回地层学和天文年代学及其在中生代的研究现状. 地学前缘, 21(2): 48—66.
- 贾承造, 施央申, 郭令智, 1988. 东秦岭板块构造. 南京: 南京大学出版社.
- 李儒峰, 陈莉琼, 李亚军, 等, 2010. 苏北盆地高邮凹陷热史恢复与成藏期判识. 地学前缘, 17(4): 151—159.
- 李三忠, 张国伟, 周立宏, 等, 2011. 中、新生代超级汇聚背景下陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲. 地学前缘, 18(3): 79—107.
- 能源, 杨桥, 张克鑫, 等, 2009. 苏北盆地高邮凹陷晚白垩世—新生代构造沉降史分析与构造演化. 沉积与特提斯地质, 29(2): 25—32.
- 钱基, 2000. 苏北盆地油气田的形成与分布特征. 石油大学报(自然科学版), 24(4): 21—25.
- 钱基, 2001. 苏北盆地油气田形成与分布——与渤海湾盆地比较研究. 石油学报, 22(3): 12—16.
- 邱海峻, 许志琴, 乔德武, 2006. 苏北盆地构造演化研究进展. 地质通报, 25(9—10): 1117—1120.
- 孙肇才, 2004. 从东海石油地质工作的重要进展看西太平洋大陆边缘新生代盆地的构造演化——一种海沟向洋后退的残余弧后盆地的演化模式. 石油实验地质, 26(2): 121—137.
- 王海方, 2016. 苏北盆地古近系页岩油储层有效裂缝识别. 西南石油大学学报(自然科学版), 38(3): 21—27.
- 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.
- 吴利仁, 1984. 华东及邻区中、新生代火山岩. 北京: 科学出版社.
- 吴欣松, 郭娟娟, 黄永建, 等, 2011. 松辽盆地晚白垩世古气候变化的测井替代指标. 古地理学报, 13(1): 103—110.
- 吴向阳, 牟荣, 石胜群, 等, 1999. 苏北盆地火成岩发育与构造演化的关系. 中国石油勘探, 4(1): 44—47.
- 许成, 匡光喜, 曾亮, 等, 2019. 华北古元古代碳酸岩起源深度及现代板块构造启动. 地球科学, 44(4): 1083—1095.
- 徐田武, 王英民, 魏水建, 等, 2008. 苏北盆地始新统三垛运动剥蚀厚度恢复. 石油天然气学报(江汉石油学院学报), 30(6): 56—60.
- 许志琴, 王勤, 李忠海, 等, 2016. 印度—亚洲碰撞: 从挤压到走滑的构造转换. 地质学报, 90(1): 1—23.
- 姚合法, 侯建国, 林承焰, 等, 2005. 多旋回沉积盆地地温场与烃源岩演化——以苏北盆地为例. 西北大学学报(自然科学版), 35(2): 195—199.
- 张沛, 周祖翼, 许长海, 2009. 苏皖下扬子区晚白垩世以来的构造—热历史: 浦口组砂岩磷灰石裂变径迹证据. 海洋石油, (4): 26—32.
- 张喜林, 朱筱敏, 钟大康, 等, 2004. 苏北盆地高邮凹陷第三系—上白垩统层序地层格架特征. 沉积学报, 22(3): 393—399.
- 郑洪伟, 李廷栋, 贺日政, 2020. 长江中下游成矿带深部结构层析成像图像揭示华北板块的东南向俯冲. 地球科学, 45(11): 4187—4197.
- 周蒂, 孙珍, 2017. 晚中生代以来太平洋域板块过程及其对东亚陆缘构造研究的启示. 热带海洋学报, 36(3): 1—19.