

富火山型断陷盆地构造-沉积协同演化机制： 以银额盆地查干凹陷下白垩统为例*

王 斌^{1,2} 傅 锚^{1,2} 单帅强^{1,2} 王德波³ 陈思芮^{1,2}
万 晶³ 杨亚波^{1,2} 周江羽⁴

1 中国石化石油勘探开发研究院, 无锡石油地质研究所, 江苏无锡 214126

2 中国石化油气成藏重点实验室, 江苏无锡 214126

3 中国石化中原油田分公司勘探开发研究院, 河南濮阳 457000

4 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 438300

摘 要 陆相断陷湖盆构造-沉积协同演化控制了盆内源-储发育与油气成藏富集过程。本研究基于岩心、钻测井分析和高分辨率三维地震资料精细解释, 明确了银额盆地查干凹陷断陷期多因素控制下的沉积体系与沉积相展布特征, 揭示了断陷期构造活动与沉积物充填的协同演化机制。研究表明, 银额盆地发育初始断陷期(SQ1)和强烈断陷期(SQ2)2个三级层序:(1)初始断陷期北东向毛西断层与北西向图拉格断层通过分段活化向放射状联结演化, 形成高分隔性断陷格局, 控制近端短轴向冲积扇-扇三角洲沉积体系发育, 高位移量断裂活化与温暖湿润气候促进半深湖-深湖相沉积体系形成。(2)强烈断陷期北东向控陷断裂系主导沉积格局: 苏一段火山活动占据可容空间, 浅湖相发育, 断陷内火山地形限制辫状河三角洲砂体分裂扩散; 苏二段火山堆积速率超越沉降速率, 导致毛西断层北段、虎勒断层南段物源衰退, 虎勒断层北段物源由西向转为北西向, 改变了砂体充填过程。初始断陷期高位移断裂与湿润气候耦合控制了查干凹陷主力烃源岩的发育与分布, 强烈断陷期火山-构造协同作用改造沉积古地貌进而调控储集砂体分布, 如火山地形阻碍砂体分裂扩散, 快速火山堆积引发物源体系迁移/衰退等, 此外多期次火山岩顶界面层状气孔带亦可形成有效的火山岩储集体, 通过断裂活动沟通深部油源即可形成油气藏。本研究所建立的构造-沉积协同演化模式可为研究区储集层预测与勘探部署提供指导, 也可为相似地质背景的断陷盆地分析提供类比模型。

关键词 沉积体系 构造-沉积协同演化 富火山型断陷 下白垩统 查干凹陷 银额盆地

第一作者简介 王斌, 男, 1981年生, 博士, 高级工程师, 主要从事沉积储集层与油气成藏研究。E-mail: wangbin.syky@sinopec.com。

中图分类号: P512.2 文献标志码: A

Tectonic-sedimentary co-evolution mechanism of volcanic-rich faulted basin: a case study of the Lower Cretaceous in Chagan sag, Yin'e Basin

WANG Bin^{1,2} FU Mao^{1,2} SHAN Shuaiqiang^{1,2} WANG Debo³ CHEN Sirui^{1,2}
WAN Jing³ YANG Yabo^{1,2} ZHOU Jiangyu⁴

* 中国石化科技攻关项目“银额盆地重点地区构造演化差异与油气差异富集”(编号: P23228)资助。[Financially supported by Scientific and Technological Project of Sinopec "Differential Tectonic Evolution and Hydrocarbon Accumulation in Key Areas of the Yin'e Basin"(No. P23228)]

收稿日期: 2025-09-21 改回日期: 2025-10-09

1 Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Jiangsu Wuxi 214126, China

2 State Key Laboratory of Petroleum Accumulation Mechanisms, SINOPEC, Jiangsu Wuxi 214126, China

3 Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Zhongyuan Oilfield Company, Henan Puyang 457000, China

4 Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 438300, China

Abstract Tectonic-sedimentary co-evolution in continental faulted lacustrine basins controls the development of source-reservoir systems and the processes of hydrocarbon accumulation and enrichment. Through meticulous analysis of core samples, drilling and logging data, and interpretation of high-resolution 3D seismic data, this study clarifies the sedimentary system characteristics and facies distribution patterns in the Chagan sag during the rift stage, revealing the co-evolution mechanism between tectonic activities and sediment filling. The research identifies two third-order sequences within the rift stage: (1) During the initial rifting phase (SQ1), the NE-trending Maoxi Fault and NW-trending Tula'ge Fault evolved from segmented activation to radial linkage, creating a highly compartmentalized rift framework. This structural pattern controlled the development of proximal, short-axis alluvial fan-fan delta systems, while intense fault displacement combined with warm-humid climates promoted the formation of semi-deep to deep lacustrine facies. (2) In the intensive rifting phase (SQ2), the NE-trending basin-controlling fault system dominated the sedimentary framework; volcanic activity during the first sub-member of the Suhongtu Formation occupied accommodation space, leading to widespread shallow lacustrine facies, while intra-rift volcanic topography fragmented braided river delta sand bodies. During the second sub-member, rapid volcanic accumulation outpaced subsidence, causing source depletion along the northern Maoxi Fault and southern Hule Fault segments, and redirecting sediment supply from the west to the northwest along the northern Hule Fault, thereby altering sandbody filling patterns. Coupling between high-displacement faults and humid climates during SQ1 controlled the development of major source rocks. Volcano-tectonic interactions during SQ2 modified sedimentary paleotopography, regulating reservoir sandbody distribution (e.g., volcanic barriers fragmenting sand bodies; rapid accumulation triggering source system migration). Volcanic interlayers with stratified vesicles form effective reservoirs when connected to deep hydrocarbon sources via fault systems. The tectono-sedimentary synergistic evolution model established in this paper can provide guidance for reservoir prediction and exploration deployment in the study area, and also offer an analog model for the analysis of fault-depression basins with similar geological settings.

Key words sedimentary system, tectonic-sedimentary co-evolution, volcanic-rich rift, Lower Geta-ceous, Chagan sag, Yin'e Basin

About the first author WANG Bin, born in 1981, is a Ph.D. and Senior Engineer. He is mainly engaged in sedimentary reservoirs and petroleum accumulation. E-mail: wangbin.syky@sinopec.com.

中国北方发育众多油气资源丰富的陆相断陷盆地，如松辽盆地、银额盆地、二连盆地等（赵贤正等，2015；沈华等，2023；张洪安等，2024；崔映坤等，2025），其形成演化过程受控于构造调节主导作用，这一过程塑造了复杂多变的构造-沉积响应关系，并且孕育出了各具特色的油气藏系统（Prosser, 1993；葛家旺等，2022）。中国外学者针

对断陷盆地的结构、断层活动、演化序列、沉积体系及其对油气成藏的控制作用展开了广泛研究（漆家福，2007；Corti, 2009；Fossen and Rotevatn, 2016；Zuo *et al.*, 2020；Tan *et al.*, 2021），并构建多种构造-沉积模型，用于指导断陷盆地沉积体系分析与储集层评价（Prosser, 1993；Gawthorpe and Leeder, 2000）。然而，除构造因素外，

气候变化、火山作用等也会显著影响断陷盆地的充填过程,导致其发育多样化的沉积充填模式。由于断陷盆地内气候变化、火山活动与构造变形之间存在复杂耦合关系,其对沉积体系演化的综合影响机制仍是当前研究中的一个挑战性课题。

银额盆地是中国北方重要的中生代含油气盆地,近年来在油气勘探领域备受关注。其次级构造单元查干凹陷因具有典型的富火山型断陷地质结构,且油气勘探成效显著,已成为该领域的研究热点区域。前人对查干凹陷的研究已取得诸多成果,涵盖形成机制 (Zuo *et al.*, 2020)、地质结构 (陶国强, 2003)、沉积相识别 (杨国臣等, 2013; Tan *et al.*, 2018)、烃源岩确定 (Niu *et al.*, 2018; 周勇水等, 2021)、断裂系统刻画、圈闭特征分析,以及储集层、盖层与油气运移规律探究等多个维度 (牛子铖等, 2016; 魏巍等, 2017; 张洪安等, 2024)。然而,当前基于其他盆地构建的构造-沉积演化模型,在阐释查干凹陷断陷期火山-沉积耦合作用下湖泊-三角洲沉积体系发育机制时存在明显不足,致使该凹陷源储展布规律难以精准刻画,油气成藏富集规律的认知也受到制约。

以银额盆地查干凹陷下白垩统为研究对象,在前人研究基础之上,通过岩心、钻测井及高分辨率三维地震资料分析,精细刻画沉积体系与沉积相展布特征。深入探讨构造活动与气候变化、火山作用等多因素控制下的沉积充填协同演化机制,建立适用于查干凹陷独特地质条件的构造-沉积演化模型,明确源储时空配置关系。研究成果既为研究区下一步油气勘探部署与开发提供关键地质依据,也为其他富火山型陆相断陷盆地研究提供可借鉴的类比模型。

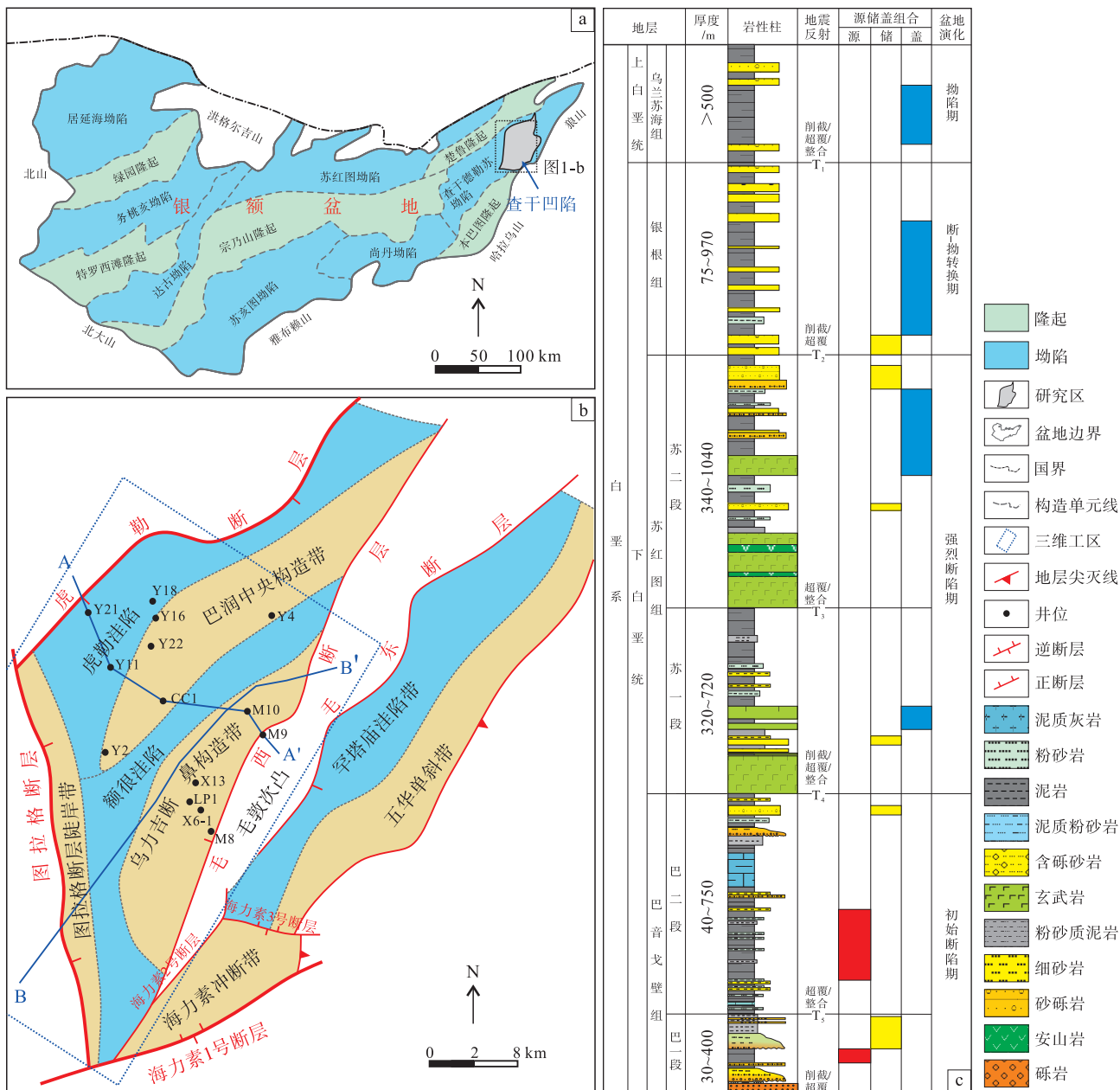
1 地质背景

银额盆地位于内蒙古自治区中西部,面积约 $12.3 \times 10^4 \text{ km}^2$,东以狼山、哈拉乌山为界,西邻北山,北至洪格尔吉山,南抵北大山和雅布赖山。区域构造上位于西伯利亚、华北、塔里木和哈萨克斯坦板块结合部位,是海西期增生型活动基底上发育的中-新生代沉积盆地,具有宽裂谷背景下的陆相断陷盆地特征 (周勇水等, 2021; 崔海峰等, 2023; 张洪安等, 2024)。沉积盖层主要为中生界侏罗系、白垩系和新生界。盆地可划分为 5 个隆起

和 7 个坳陷 (图 1-a),坳陷内发育多个次级凹陷和凸起,如查干凹陷、拐子湖凹陷、哈日凹陷等 (牛子铖等, 2016; 崔海峰等, 2023)。

银额盆地可识别出晚三叠世至晚白垩世多期中生代岩浆事件 (卫平生, 2006)。火山活动始于早白垩世早期巴音戈壁组沉积初期,于苏红图组沉积期达峰,属东亚大火山岩省西段,与华北及蒙古部分火山活动特征相似。哈日凹陷 YHC1 井钻遇早白垩世早期 (约 132 Ma) 中基性火山岩,规模小、分布局限,属板内伸展成因 (陈志鹏等, 2019)。早白垩世晚期火山活动强烈且分布广,查干德勒苏坳陷及尚丹坳陷东部均有分布。查干凹陷钻井钻遇该时期 (113–106 Ma) 中基性火山岩 (Tan *et al.*, 2021),样品具 LILEs 和 LREE 略富集、Nb-Ta 不亏损、Pb 略亏损及 Sr-Nd 同位素亏损特征 (钟福平等, 2011),地幔源区亲华北型,与古太平洋构造域 115 Ma 后洋岛型镁铁质岩浆组成相似 (Zheng *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2025),成因与古太平洋板块俯冲相关,属于板内伸展 (Zuo *et al.*, 2020)。

查干凹陷位于银额盆地东北部查干德勒苏坳陷中部,凹陷内发育乌力吉断鼻构造带、巴润中央构造带、额很洼陷、虎勒洼陷等次级构造单元,形成“洼隆相间”的构造格局 (图 1-b),断层以 NE-NEE 向正断层为主,控制沉积中心迁移 (杨国臣等, 2013; Zuo *et al.*, 2020)。其构造演化自早白垩世至新生代可划分为 3 个阶段:断陷期 (巴音戈壁组—苏红图组沉积期)、断拗转换期 (银根组沉积期) 及拗陷期 (乌兰苏海组—古近系沉积期)。其中,断陷期可细分为初始断陷期 (巴音戈壁组沉积期) 与强烈断陷期 (苏红图组沉积期) (Tan *et al.*, 2021)。早白垩世断陷期,区域受近 NW-SE 向伸展作用主导,凹陷主要受毛西断层、图拉格断层、虎勒断层及巴润断层控制断陷活动 (杨国臣等, 2013)。其中,图拉格断层与毛西断层构成对向相干型半地堑组合,虎勒断层与巴润断层为同向继承型半地堑组合,且两者与毛西断层共同构成对向相干型半地堑组合 (陈发景等, 2011)。初始断陷期巴音戈壁组主要发育扇三角洲—中深湖相沉积体系,强烈断陷期苏红图组则以辫状河三角洲—浅湖相沉积为主。银根组沉积期查干凹陷进入断拗转换期,控陷断裂活动渐弱,沉积环境由三角洲相沉积体系逐步过渡为河流相沉积体系。上白垩统乌兰



a—银额盆地构造分区；b—查干凹陷构造单元划分；c—查干凹陷下白垩统综合柱状图

图 1 银额盆地查干凹陷构造纲要图

Fig. 1 Structural outline map of Chagan sag in Yin'e Basin

苏海组沉积期，凹陷进入拗陷期整体热沉降阶段，控陷断裂活动停止。新生代时期，受喜马拉雅运动的影响凹陷处于挤压应力场中，发生构造反转，导致局部地区乌兰苏海组及其上覆地层遭受剥蚀 (Zuo *et al.*, 2020) (图 1-c)。

下白垩统源储盖配置良好，巴音戈壁组为主力烃源岩层系，有机质丰度高，类型以 II₁、II₂ 型为主，处于成熟、高成熟阶段 (周勇水等, 2021)。储

集层类型多样，巴音戈壁组发育扇三角洲碎屑岩、苏红图组发育辫状河三角洲碎屑岩和火山岩储集层，银根组则以辫状河三角洲砂体为主，储集层物性总体为低孔特低渗，但局部受溶蚀改造形成优质储集层 (魏巍等, 2017)。盖层以湖相泥岩为主，银根组和乌兰苏海组泥岩厚度大、分布广，封盖条件好，形成“自生自储”、“下生上储”等多种成藏组合 (史大海等, 2013; 张洪安等, 2024)。

2 等时地层格架与沉积古地貌

2.1 层序界面识别与划分

以银额盆地查干凹陷构造-沉积演化背景为约束,开展高精度三维地震资料解释,系统识别同相轴的削截、上超、下超等典型反射结构,结合钻井岩性和测井曲线的突变特征分析,确定地震反射特征与层序界面地质响应关系,全区共识别出 T_g 、 T_4 、 T_2 和 T_1 共 4 个关键层序界面(图 2)。 T_g 为一级层序界面 SB,为断陷期与前断陷期地层的分界面,该界面下部发育不连续杂乱地震相反射,上部为连续性较好的强反射特征,地震剖面上可见典型的削截现象。 T_1 为二级层序界面,为断陷期与拗陷期地层的分界面,地震剖面上可见明显上超、削截现象。 T_4 与 T_2 分别对应三级层序界面 SB1 和 SB2,地震剖面上 T_4 界面在盆缘可见上超反射终止特征, T_2 界面可见局部的削截及上超反射终止特征,依据 T_g 、 T_4 和 T_2 界面将断陷期地层划分为 2 个三级层序,即 SQ1 和 SQ2。其中, SQ1 对应于初始断陷期巴音戈壁组,为中低频连续性地震反射,表现为沉积岩地震相特征。SQ2 对应于强烈断陷期苏红图组,为中高频连续性多变地震反射,表现为多期次火山岩地层与沉积岩地层交互的地震相特征,沉积地层上超或顶超在火山地层之上,与上覆、下伏地层地震相差异显著。

在地震层序界面识别的基础之上,开展天文旋回、小波变换以及岩性-电性特征分析,对 M10 井等重点钻井的层序和体系域进行了精细划分,井一震标定后追踪地震层序和体系域界面,建立了研究区断陷期高精度等时层序地层格架(图 2)。以 M10 井为例(图 3),巴音戈壁组主要为厚层砂岩、砾岩、角砾岩与薄层泥砂互层沉积,去铀钾钍校正伽马曲线(KUT-Corrected GR)表现为齿化箱形和齿状交互特征。通过天文旋回及小波变换分析,识别出 26 个 405 ka 长偏心率周期信号,表明该地层沉积持续时间约为 10.5 Ma。苏红图组则为大套厚层火成岩夹薄层泥岩,以及泥岩与砂砾岩互层沉积。其中,泥岩与砂砾岩的校正伽马曲线呈现高幅齿状或平滑高值特征,而火成岩被视为瞬时事件,未纳入旋回分析范围。该组共识别出 21 个 405 ka 长偏心率周期信号,地层沉积持续时间约为

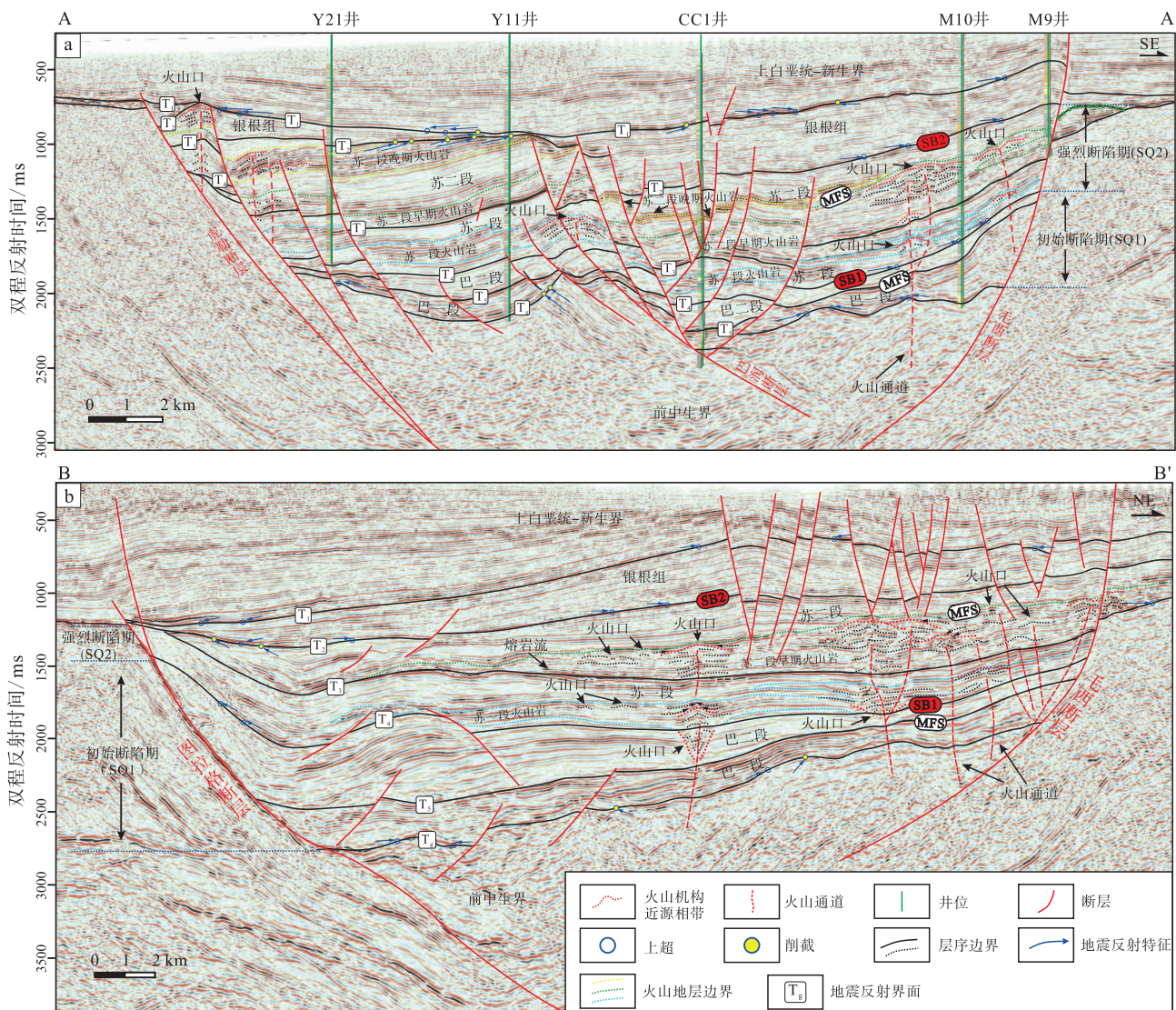
8.5 Ma。天文旋回信号提取的地层沉积噪声信号揭示了沉积过程中古水深变化响应关系,并与沉积速率存在良好对应关系,即深水期沉积速率显著降低,枯水期沉积速率则上升。基于长偏心率周期、湖平面变化以及岩性-电性特征,将 SQ1 划分为 LST(低位体系域)、EST(湖扩体系域)和 RST(高位体系域)3 个体系域,其中 EST 与 RST 界面与巴一段与巴二段界限相当,为 SQ1 层序最大湖泛面(MFS)。SQ2 则划分为 EST 和 RST 两个体系域,分界面 MFS 位于苏二段早期火山活动之后。

2.2 古地貌重建

以三级层序 SQ1、SQ2 的顶界面 SB1 和 SB2 为披覆标志层,基于钻井和三维地震资料解释,获取巴音戈壁组与苏红图组残余地层厚度,通过地层趋势法,恢复了 2 个时期剥蚀区域的地层剥蚀量,并基于岩石骨架体积不变的原则,对目的层地层厚度进行去压实校正,从而恢复原始沉积厚度(叶蕾等, 2023),最终实现目的层古地貌的镜像重建。

SQ1 层序(巴音戈壁组)沉积前古地貌(图 4-a)显示,断陷发育初期呈北东走向,以多个小型半地堑组合为特征,具有明显的分隔性,南西向图拉格断层与北东向毛西断层附近为陡坡,西侧与北侧地层抬升形成斜坡。结合砂地比和控陷断裂活动性分析(图 5),认为巴音戈壁组沉积时期发育毛西断层、图拉格断层一侧的短轴物源和北部斜坡带的长轴物源供给,但由于坡度和地貌分隔性制约,陡坡带的短轴方向砂体展布局限,而北部斜坡带的长轴方向砂体延伸规模相对较大。

SQ2 层序(苏红图组)沉积前古地貌(图 4-b)显示,强烈断陷期断陷继承北东走向,但沉积地貌坡度较巴音戈壁组时期降低,分隔性减弱。虎勒断层和巴润断层开始活动,将沉积地貌分隔为北东向复式半地堑组合。巴润断阶带地层抬升,其西侧虎勒断层发育陡坡,中部巴润断层与东侧毛西断层控制对向陡坡带,形成 2 个大规模洼陷带。结合砂地比和控陷断裂活动性分析(图 5),推测苏红图组沉积时期存在南东向和东向的继承性物源体系,同时西侧虎勒断层下盘发育新生的物源体系,而北侧的长源物源体系逐渐消亡。



a—NW-SE 向连井地震剖面；b—SW-NE 向地震剖面

图 2 查干凹陷地质结构及层序格架特征

Fig. 2 Characteristics of geological structure and sequence stratigraphic framework in Chagan sag

3 沉积体系与展布

3.1 沉积体系特征

通过对 14 口钻井岩心的观察，识别沉积结构、岩性、粒序变化及沉积构造，建立了取心段的沉积体系与相模式。在查干凹陷下白垩统，识别出冲积扇、扇三角洲、辫状河三角洲、滨浅湖—浅湖、半深湖—深湖和火山岩 6 种沉积体系(图 6)，结合典型测井相分析(图 7)，将模式外推至全井段。利用地震资料，分析反射振幅、连续性和反射形态等特征，划分地震相(图 8)。通过井—震结合，开展典型地震剖面的地震相与沉积相分析，最终明确了研

究区断陷期沉积体系的纵向发育特征(图 9；图 10)。

3.1.1 冲积扇

冲积扇是查干凹陷下白垩统最粗粒的沉积单元，主要分布在巴音戈壁组断裂陡坡带周缘及北部斜坡带。其岩性以杂色泥质或碎屑支撑的角砾岩为主，砾石呈块状、棱角状，分选极差，砾径介于 0.1~6 cm 之间，砾石含量通常超过 60%，粒序变化不明显或仅具弱正粒序(图 6)。冲积扇测井曲线特征呈现为微齿箱型，地震剖面上表现为中低频、变振幅、杂乱断续地震反射特征，指示了高能的沉积环境(图 7；图 8)。

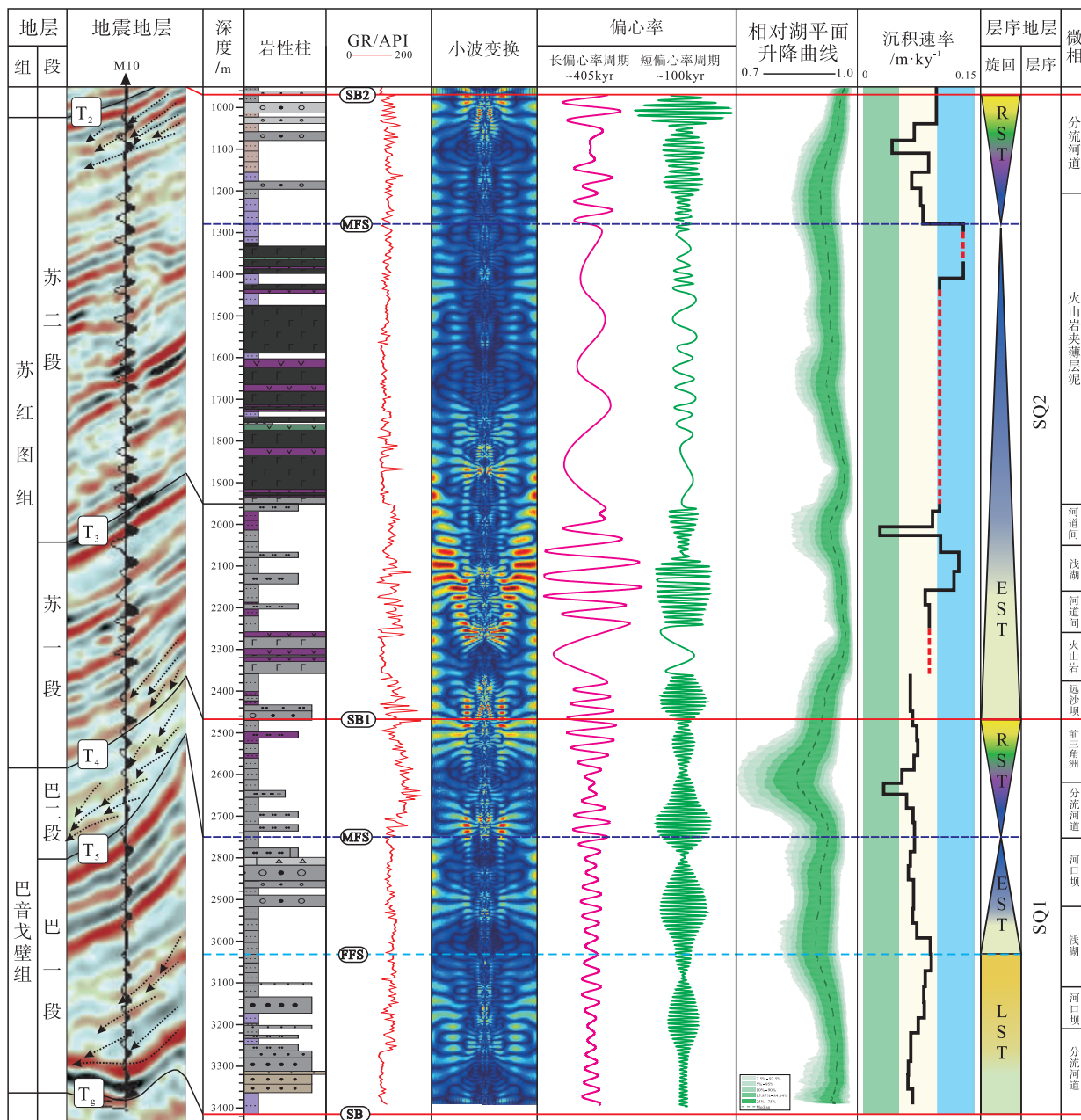


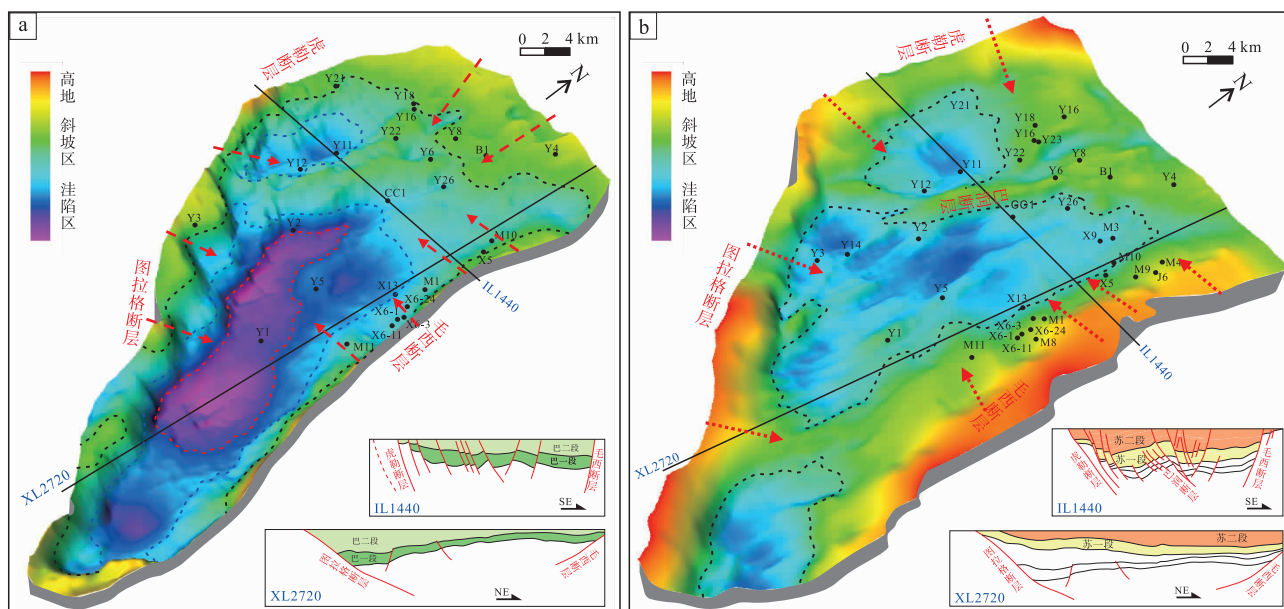
图 3 查干凹陷 M10 井下白垩统单井层序与沉积相综合柱状图

Fig. 3 Composite stratigraphic column of sequence stratigraphy and sedimentary facies of the Lower Cretaceous of Well M10 in Chagan sag

3.1.2 扇三角洲

扇三角洲特指冲积扇直接入湖形成的富砾石三角洲。与冲积扇沉积相比，其粒度较细，粉砂岩与泥岩含量显著增加。查干凹陷多口钻井揭示该沉积体系，岩性以浅灰色、灰色砂砾岩、含砾砂岩、中粗一中细砂岩为主，垂向上发育多期正韵律叠置，局部见反韵律(图 6)。整体以向上变粗序列为特

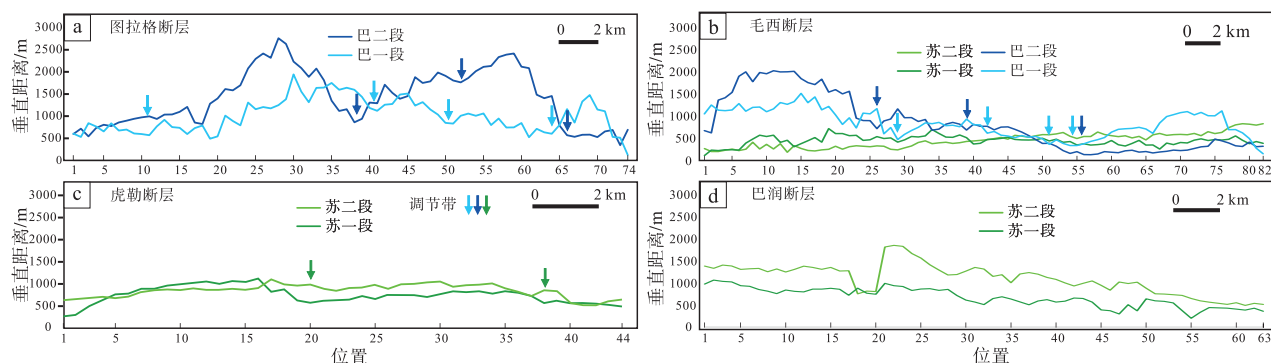
征，主要发育扇三角洲前缘沉积亚相，包括水下分流通道（正韵律，低幅齿化箱型测井响应）和河口坝（反韵律，漏斗形测井响应）微相(图 7)。在地震剖面上，该沉积体系沿物源方向呈一组同向倾斜的同相轴，具有楔形前积反射结构，走向上表现为丘形地震相(图 9；图 10)。此类沉积相主要发育于研究区初始断陷期，分布于西南部与东部的



a—SQ1层序沉积前；b—SQ2层序沉积前

图 4 查干凹陷早白垩世沉积古地貌

Fig. 4 Restoration maps of sedimentary palaeogeomorphology of the Early Cretaceous in Chagan sag



a—图拉格断层；b—毛西断层；c—虎勒断层；d—巴润断层

图 5 查干凹陷巴音戈壁组与苏红图组主干断裂活动历史

Fig. 5 Fault displacement and growth history during the Bayingebi and Suhongtu Formations deposition in Chagan sag

断陷陡坡带及北部斜坡带。

3.1.3 辫状河三角洲

查干凹陷下白垩统辫状河三角洲沉积主要由中细—细砂岩构成，常与泥岩呈互层状产出。基于岩心观察，研究区辫状河三角洲沉积主要发育前缘水下分流河道和河口坝 2 种微相。水下分流河道以分选较好的中粗—细砂岩为主，发育冲刷面，常见平行层理，具有正韵律旋回(图 6)，测井曲线表现为齿化箱型或钟型。河口坝沉积则以灰色含砾中细—中粗砂岩为主，反韵律旋回发育，测井曲线呈微齿化漏斗形或箱型(图 7)。在地震剖面上，该沉积体

系沿物源方向具有斜交、叠瓦前积或席状反射特征(图 8)，主要发育于 SQ2 层序中，分布在虎勒断层和毛西断层构造带的短轴方向(图 9；图 10)。

3.1.4 滨浅湖—浅湖

滨浅湖—浅湖相沉积以紫红色、灰绿色和灰色泥岩与粉砂岩互层为主，多具块状构造，发育水平层理和波状层理，常见生物扰动现象。其中，紫红色泥岩指示极浅水的氧化环境，而灰绿色和灰色泥岩则指示相对较深水的还原环境。在测井特征上，该沉积单元的自然伽马值相对较高，测井曲线呈现微齿化箱型夹高幅指形的形态。在地震剖面上，其

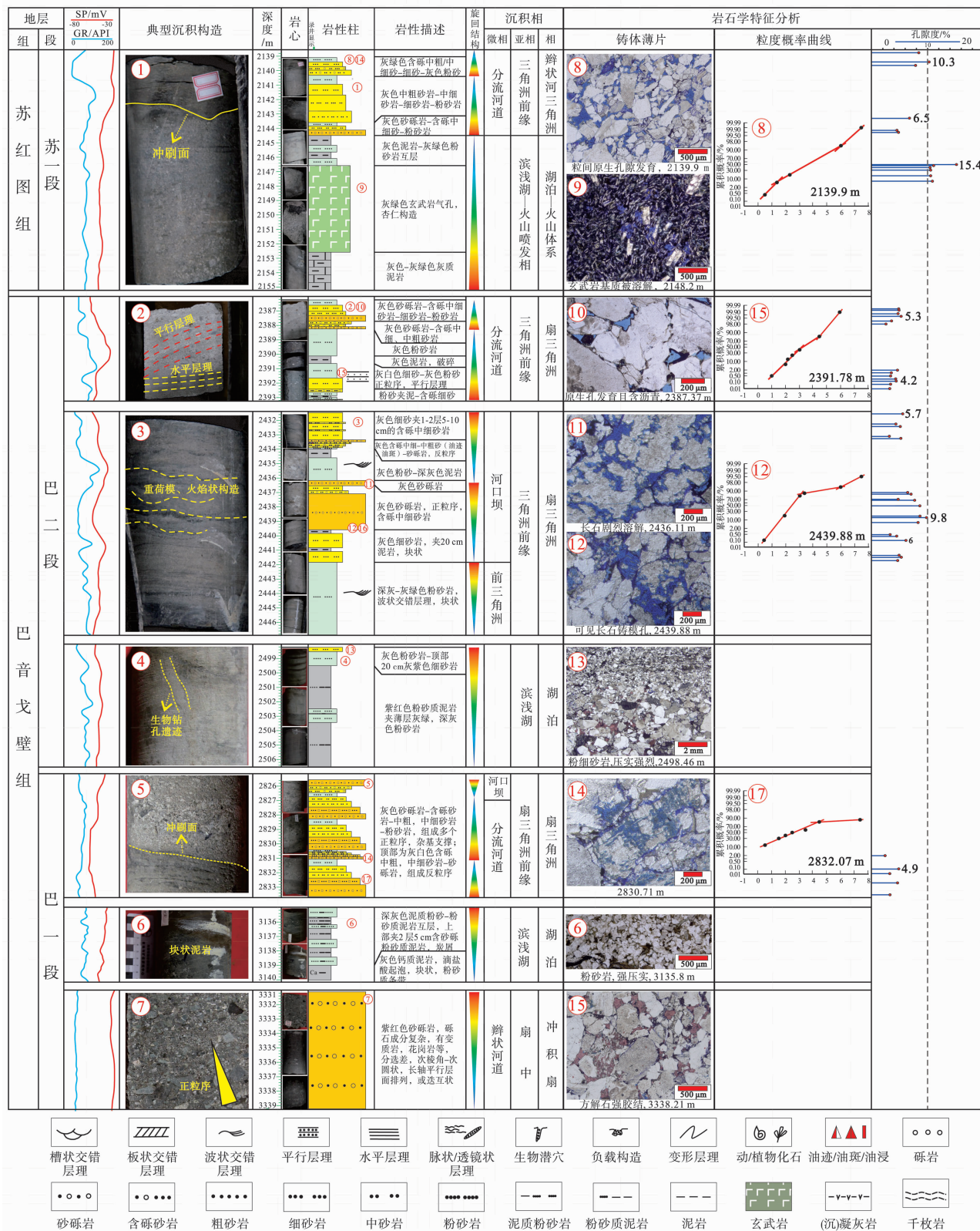


图 6 查干凹陷 M10 井下白垩统取心段沉积相综合柱状图

Fig. 6 Lithofacies composite columnar diagram of the Lower Cretaceous core section of Well M10 in Chagan sag

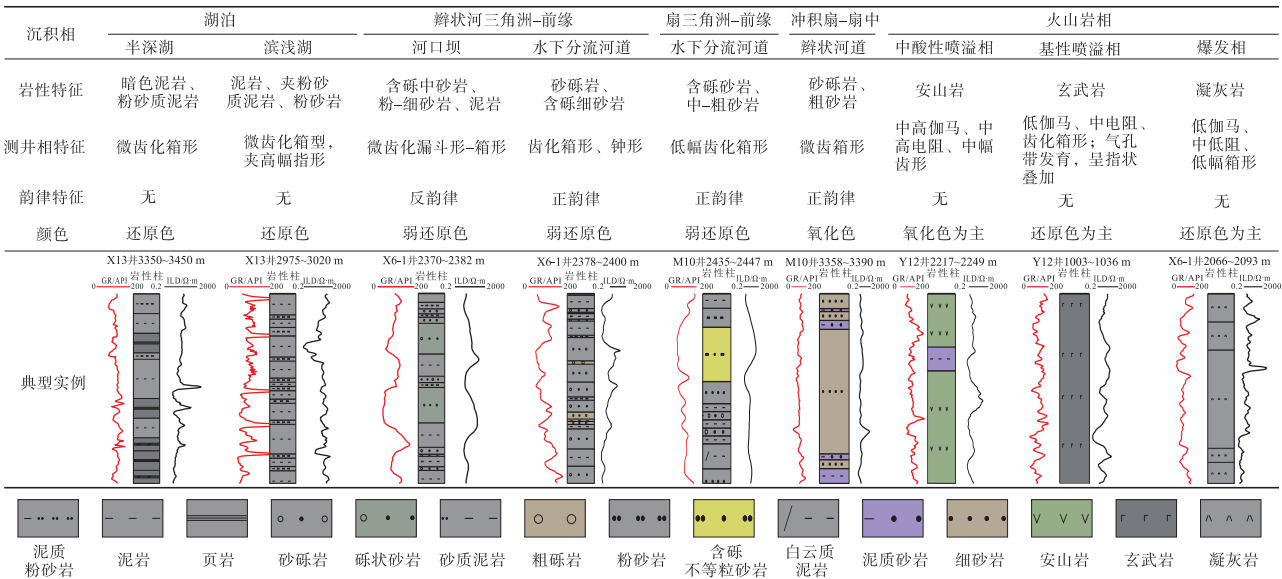


图 7 查干凹陷典型测井相类型及其特征

Fig. 7 Types and characteristics of typical seismic facies in Chagan sag

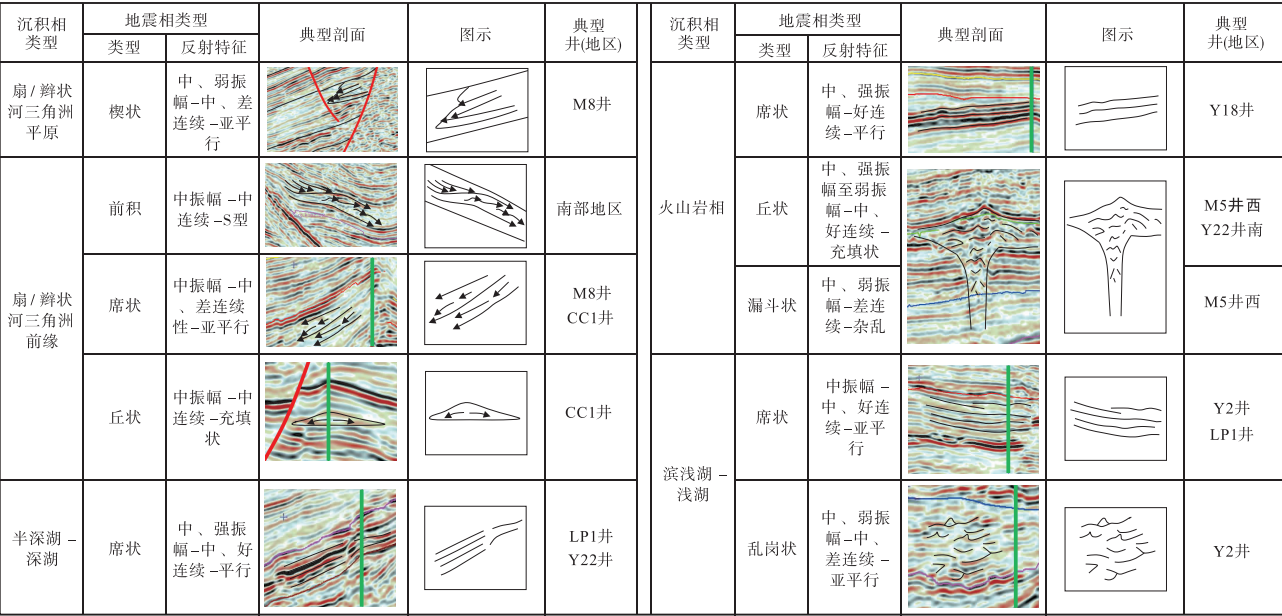


图 8 查干凹陷典型地震相类型及其特征

Fig. 8 Types and characteristics of typical seismic facies in Chagan sag

反射特征表现为中—好连续的亚平行席状反射或中、差连续的乱岗状反射(图 7; 图 8)。该沉积单元在 SQ2 层序中广泛分布,而在 SQ1 层序中分布较为局限(图 9; 图 10)。

3.1.5 半深湖—深湖相

半深湖—深湖沉积是查干凹陷下白垩统最细粒的沉积单元,主要由厚层(数十米至数百米)黑色块状泥岩构成,发育页理、黄铁矿及鱼化石等典

型深水沉积标志,反映了静水、强还原的深湖环境。部分厚层泥岩中有薄层粉砂岩夹层,可能与阵发性重力流事件有关。在测井特征上,该沉积单元表现为相对光滑的微齿化箱型,具有极高的自然伽马值。在地震剖面上,其反射特征为中至强振幅、中至好连续的平行席状反射(图 7; 图 8)。该沉积单元主要发育于 SQ1 层序中,空间上集中分布于额很洼陷与虎勒洼陷构造带内(图 9; 图 10),是

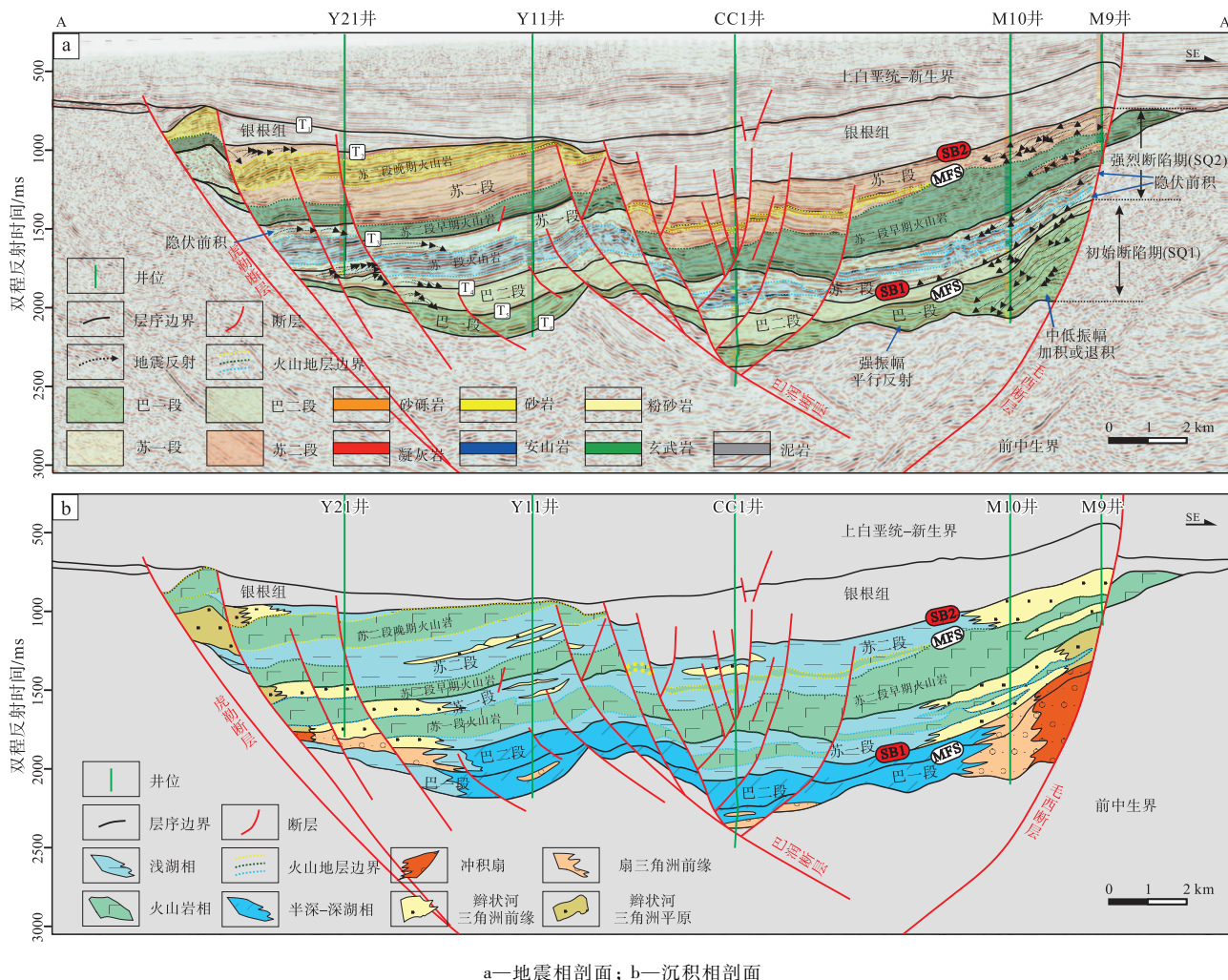


图 9 查干凹陷近东西向 AA'地震相和沉积相剖面

Fig. 9 Seismic and facies profile map of the near east-west AA' section in Chagan sag

研究区的主要烃源岩层系，具有良好的生烃潜力。

3.1.6 火山岩相

在断陷盆地中，火山岩的形成在时间尺度上可视为沉积体系中的“瞬间事件”，但在空间尺度上，大规模火山喷发能够形成区域性的火山岩地层。这种地层作为沉积体系中的重要界面或标志层，显著控制了后续沉积体系的分布与演化。在查干凹陷 SQ2 层序中，火山岩地层广泛发育，多口钻井揭示其占比超过 50%。岩性以喷溢相的中基性火山熔岩为主，低黏度的岩浆广覆式分布，厚度中心位于毛西断层与巴润断层近端(图 2；图 9；图 10)，测井特征表现为低伽马、中电阻、齿化箱型，部分层段夹有指形气孔带(图 7)。M10 井和 Y2 井苏红图组火山岩样品实测孔隙度为 1.16%~18.8%，平均 5.18%，镜下鉴定揭示储集空间主要

为玄武岩原生气孔、杏仁体内孔和斑晶/基质溶孔(图 6)。地震相上，近源火山通道常呈现丘状或漏斗状反射，顶部因与周缘沉积层波阻抗差异大，常具强振幅反射(图 2；图 8)。向中远源相带逐渐减薄，地震相表现为中至强振幅、好连续性、平行席状反射(图 2；图 8)。此外，研究区部分地层发育爆发相的火山碎屑岩堆积，主要分布在西北部的 Y18 井区，毛西断层上盘的 X6-1 井区也有少量发育，测井特征表现为低伽马、中低阻、低幅箱型(图 7)，近源相带具有小型顶部丘状、底部漏斗状的火山通道地震反射特征，而中远源相带与周缘地层的地震反射特征分异不明显(图 2；图 8)。

3.2 沉积相平面展布

在综合岩心、测井和地震相分析的基础上，为

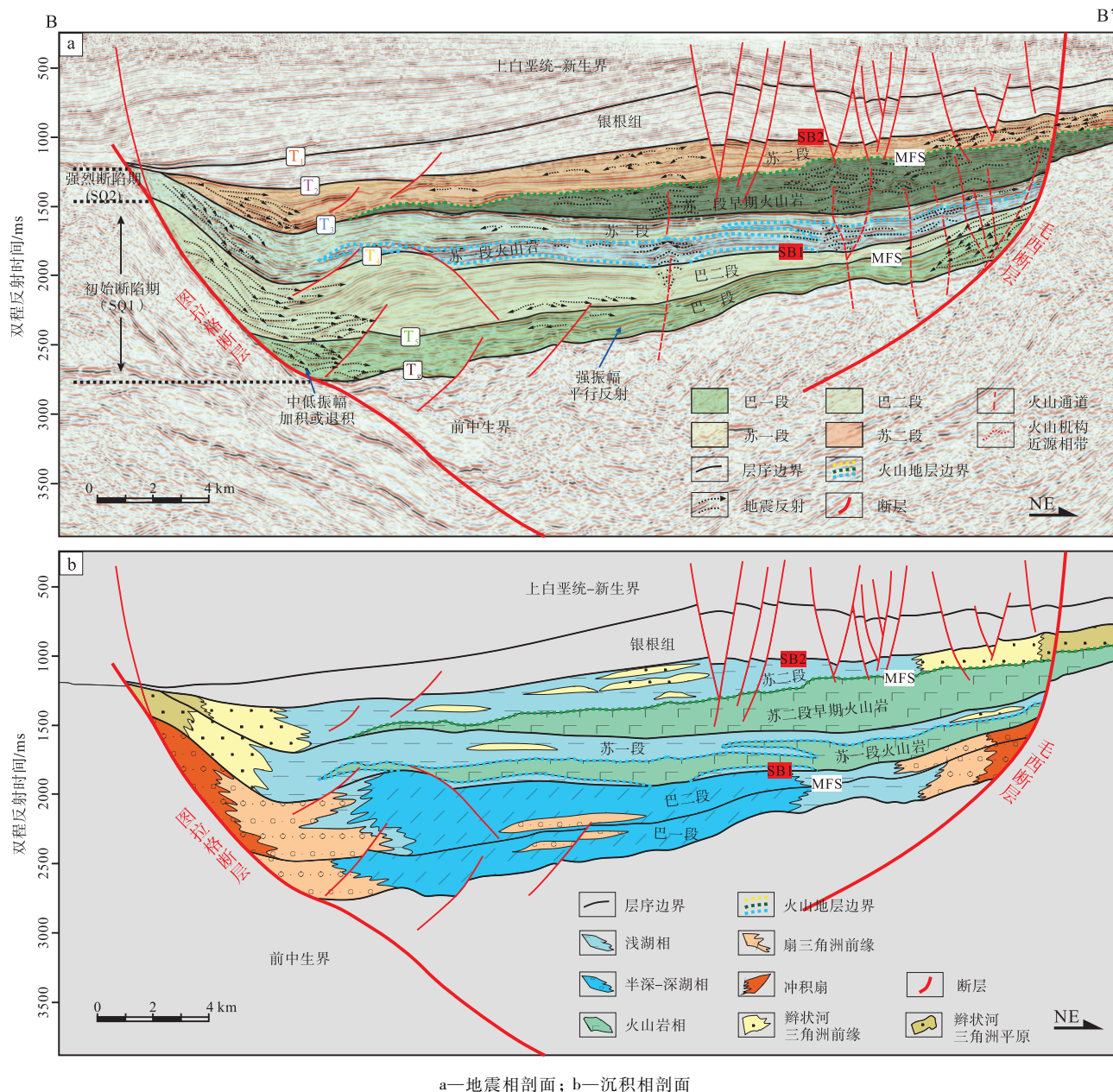


图 10 查干凹陷近南北向地震相—沉积相剖面图

Fig. 10 Seismic facies-profile map of the near north-south section in Chagan sag

精准约束查干凹陷不同时期沉积相的空间展布特征，本研究采用无监督式学习的神经网络方法，选取相关性高 (>0.9) 的地震层属性（如均方根振幅、弧长、平均包络等）作为训练数据，并根据研究区沉积体系特征设定不同层系的数据分类数量。通过设置最大迭代次数为 500 次，获取各层系的层属性神经网络分析结果，结合古地貌、砂岩百分含量等值线等沉积体系研究，表征不同阶段沉积物的平面展布特征。

3.2.1 巴音戈壁组 (SQ1)

巴音戈壁组主要发育扇三角洲和深水沉积体系。巴一段沉积时期，SQ1 层序的低水位体系域 (LST) 和湖侵体系域 (EST) 均有发育。在低 LST 时水位期，发育的粗碎屑扇三角洲体系规模有限，主要分布在断陷边缘的陡坡带及北部斜坡带。在 EST 时期，受高湖平面影响，全区以湖相沉积为主，扇三角洲砂体展布受限。控陷断裂图拉格断层和毛西断层近端发育短轴物源水系。毛西断层上盘

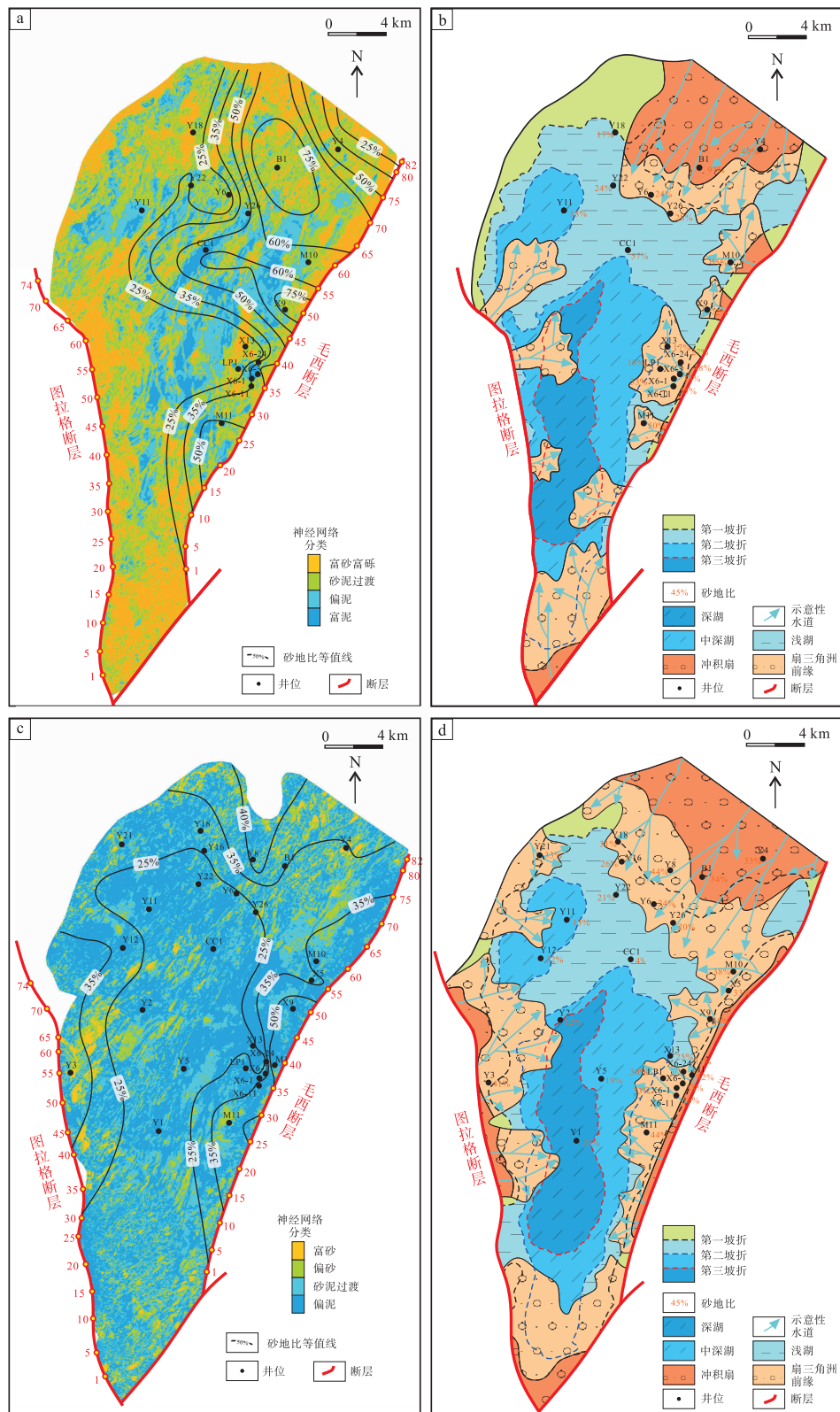
的 M10 井、X9 井、X6-3 井、M11 井等钻井钻遇的砂体厚度均超过 100 m, 其中 M10 井钻遇砂体厚度达 361 m。砂地比等值线趋势显示砂地比高值区与砂岩厚度高值区相近(图 11-a), 地震剖面上陡坡带呈现楔状反射(图 9; 图 10), 证实了毛西断层一侧新生短轴物源的存在。图拉格断层上盘虽无钻井钻遇巴一段, 但神经网络分析显示富砾富砂区域与毛西断层上盘砂地比高值区有较好对应关系, 推测图拉格断层上盘橙色分布区为扇三角洲砂体沉积(图 11-a)。断陷北侧斜坡区 B1 井、Y4 井砂地比高值区指示沉积物来自长轴物源水系, 而西侧斜坡带地震剖面多为连续性好的上超地震反射特征, 推测巴一段西侧区域物源水系并不发育。短轴物源的供给在图拉格断层与毛西断层陡坡带一侧形成多个小型朵叶状扇三角洲扇体, 受该时期分隔性较强的地貌影响, 这些扇体的延伸范围有限, 展布多在断层 5 km 范围内, 北侧斜坡带冲积扇携带砂体进入断陷则形成规模较大的浅水扇三角洲(图 11-b)。在虎勒、额很洼陷带, Y11 井与 X13 井等井钻揭巴一段暗色泥岩, 地震剖面上巴一段也多为连续性好的亚平行—平行席状地震反射(图 9; 图 10), 指示该时期广泛发育半深湖—深湖沉积体系。

巴二段沉积时期处于 SQ1 的湖退体系域(RST)发育阶段, 物源供给方向继承了前期特征, 主要来自图拉格断层和毛西断层近端的短轴水系, 同时北侧长轴物源水系也较为发育(图 11-c, 11-d)。在毛西断层上盘区域, M1 井、X9 井、X6-1 井、X6-3 井、M11 井等井钻遇的砂体总厚度超过 200 m, 其中 M1 井钻揭砂体厚度最大, 达 441 m。此外, Y3 井钻遇 103 m 厚的砂体, 砂地比为 0.41, 指示图拉格断层近端短轴物源的发育; 而西侧 Y21 井钻遇 86 m 厚的砂体, 砂地比为 0.33, 证实了该时期西侧斜坡带新生物源体系的活动。该阶段沉积体系类型主要由扇三角洲、半深湖—深湖沉积体系组成, 沉积物以富砾粗碎屑沉积夹灰色、黑色泥岩为主。图拉格断层和毛西断层的活动性增强, 导致沉降中心向研究区南部迁移, 形成的可容纳空间较巴一段沉积时期更大(图 11-d)。高可容纳空间促使相对湖平面快速上升, 27 口钻井钻遇泥岩平均厚度达 351 m, 其中额很洼陷 Y1 井泥岩厚度最大, 达 925 m。Y1 井、X13 井、X6-1 井等多口井钻揭

该时期灰黑色、黑色泥岩发育, 表明额很洼陷与虎勒洼陷区域主要发育中深湖—半深湖相沉积。在 RST 时期, 东西两侧陡坡带与北侧斜坡带发育扇三角洲沉积体系, 随着沉积充填作用的进行和构造沉降的减弱, 继承性物源体系逐渐成熟并提供更丰富的沉积物供给, 导致巴二段沉积时期扇三角洲的延伸与展布范围显著扩大。神经网络分析结果也表明, 富砂偏砂的扇三角洲区域展布较巴一段更广, 且呈连片分布特征(图 11-c)。此外, 西侧斜坡带新生物源水系控制了 Y21 井与 Y11 井区扇三角洲沉积体系的发育, 该区域与巴一段沉积时期相比, 具更高的砂地比值, 地震剖面上呈现连续性中等的前积楔形地震反射, 也证实了该区域扇三角洲沉积活动(图 11-d)。

3.2.2 苏红图组(SQ2)

苏红图组为富火山地层充填, 主要发育苏一段、苏二段早期及苏二段晚期 3 期火山活动, 同期发育辫状河三角洲与浅水沉积体系(图 9; 图 10)。三期火山活动将该时期沉积空间划分为苏一段火山活动同期沉积、苏二段早期火山活动后沉积及苏二段晚期火山活动后沉积 3 个单元(图 9)。苏一段沉积时期处于 SQ2 层序的湖侵体系域(EST), 虎勒断层与巴润断层开始控陷活动。虎勒断层、巴润断层、毛西断层 3 条控陷断裂将该时期的可容纳空间分隔为西部半地堑和东部地堑 2 部分, 在平面上形成了 NE 走向的半地堑组合(图 4-b)。该时期物源体系发生显著变化, 长轴物源体系消亡, 主要发育短轴物源输入系统, 沉积物以细粒碎屑岩夹灰色、灰绿色及紫红色泥岩为主。同时, 该时期大量火山岩充填, 岩性以玄武岩和凝灰岩为主, 地震剖面揭示该时期多为小型单成因火山(体积 $<10 \text{ km}^3$)(图 2)。研究区内 30 余口钻井揭示, 火山岩平均厚度为 190 m, 火山岩占地层厚度比值(火地比)平均为 0.38。其中, 西部 Y12 井钻遇最厚火山岩地层, 厚度达 494 m; 东部 X6-1 井具有最高火地比值, 为 0.86。神经网络分析结果揭示了 Y12 井区域和 X6-1 井区规模性火山岩体的发育特征(图 12-a, 12-b)。短轴物源体系主要分为东部毛西断层近端物源和西部虎勒断层近端物源。东部物源体系具有继承性发育特征, 砂地比高值趋势指示其物源输入区域与巴音戈壁组大致相似(图 12-a)。毛西断层上盘的 M4 井、M3 井、M1



a—巴一段神经网络属性；b—巴一段沉积相；c—巴二段神经网络属性；d—巴二段沉积相

图 11 查干凹陷巴音戈壁组 (SQ1) 神经网络属性和沉积相平面分布

Fig. 11 Plane distribution of neural network attribute classification and sedimentary facies of the Bayingebi Formation (SQ1) in Chagan sag

井、M11 井等井钻遇的砂体总厚度超过 100 m, 其中 M11 井钻遇砂体厚度最大, 达 383 m, 证实了毛西断层近端物源的输入。然而, 苏一段时期多旋回的中基性火山熔岩充填了大量可容纳空间, 小规模瞬时的火山活动限制了辫状河三角洲的发育规模(图 12-b)。虎勒断层的活动促进了西部物源体系的发育, 砂地比高值趋势指示了西部主要物源输入方向, Y18 井、Y16 井、Y22 井等井揭示砂体总厚度均超过 100 m, 指示虎勒断层北部存在大型辫状河三角洲沉积, 地震剖面上表现为叠瓦—隐伏前积反射特征。此外, 图拉格断层在苏一段沉积时期开始停止活动, 但是先存的物源输入体系逐渐成熟, 控制了西南部近端辫状河三角洲沉积体的发育, Y3 井与神经网络分析的偏砂区域展布指示了该区域辫状河三角洲的分布范围(图 11-a)。

苏二段沉积时期处于 SQ2 层序的高位体系域(HST), 火山活动规模较苏一段沉积时期显著增强, 岩性以中基性火山熔岩为主, 局部伴生火山碎屑岩沉积, 火山机构类型转变为大型多成因火山(体积 $>10\text{ km}^3$)。研究区 34 口井揭示, 火山岩地层平均厚度达 295 m, 平均火地比值为 0.41。其中, 西部地堑 Y12 井、Y8 井等井与东部地堑 M4 井、M10 井、X9 井等井钻遇火山岩地层超过 400 m, 火地比值均高于 0.5(图 12-c, 12-d)。苏二段沉积早期的火山活动集中在巴润、毛西断层近端, 沉积地貌受火山物质快速充填改造变得平缓, 继承性发育辫状河三角洲—浅湖沉积, 岩性主要为中—细砂岩夹灰色、紫红色泥岩。东部毛西断层近端物源体系与苏一段沉积时期相似, 火山地层具有北厚南薄的特征, 早期火山活动后辫状河三角洲主要发育在 M3 井、X9 井区南部, 沉积充填过程降低了早期火山地貌落差, 晚期火山活动后北部 M4 井区的辫状河三角洲沉积体系开始发育(图 12-b)。受早期的火山活动超覆至虎勒断层下盘影响, 虎勒断层附近的物源水系由西向转变为西北向, 控制了 Y15 井区辫状河三角洲沉积发育, 而 Y21 井、Y12 井区火山活动规模强, 砂体发育受限, 主要为浅湖沉积(图 12-a, 12-b)。苏二段沉积晚期的火山活动主要集中在虎勒断层近端, 大量的火山岩充填也限制了后续西部半地堑碎屑岩沉积体系的发育(图 2-a)。

4 构造-沉积协同演化规律与模式

断陷演化通常经历初始断陷、强烈断陷和萎缩断陷 3 个阶段, 各阶段具有不同的伸展断层组合和沉积充填样式(Prosser, 1993; 葛家旺等, 2022)。本研究在查干凹陷识别出初始断陷期和强烈断陷期 2 个阶段, 这 2 个阶段在盆地构造格局和地貌特征上存在显著差异。本节将探讨这 2 个阶段的构造活动对盆地结构及沉积充填过程的控制作用。

4.1 初始断陷期(SQ1)

根据 Prosser (1993) 经典模型, 初始断陷阶段控陷断层活动引发地表沉降, 沉积作用同步发生, 此时沉积物供给速率通常大于构造沉降速率, 形成补偿型盆地充填样式。然而, 查干凹陷初始断陷期在 NW-SE 向伸展应力作用下, 图拉格断层与毛西断层构成对倾式相干半地堑系统, 其充填样式表现为欠补偿型。位移量定量分析揭示, 巴一段沉积期断层具有分段活动的特征, 图拉格断层中—北段及毛西断层南段活动性最强(图 5-a, 5-b)。这些控陷断层的活动主导了多沉降中心的发育, 塑造了相对分隔的古地貌格局。不同于中国北方海拉尔、松辽盆地等地区初始断陷期控陷断层的低位移量(刘玉虎等, 2020; 宋健, 2020; 葛家旺等, 2022), 查干凹陷初始断陷期控陷断层(图拉格断层最高位移量达 1500 m, 毛西断层最高位移量达 1000 m)展现出显著高的位移量或构造沉降幅度。这种高位移量活动可能受控于基底先存应力薄弱带的复活, 例如图拉格断层 NNW 走向与区域 NW-SE 向伸展应力方向斜交, 其优先活动指示了基底存在先存薄弱带, 毛西断层活动位置也受到前断陷期毛西次凸大规模花岗岩侵入体形成的先存薄弱带控制(陶国强, 2003)。上述先存薄弱带的复活导致上盘岩体发生旋转滑脱, 产生瞬时沉降空间, 驱动了高位移量的断层活动(Henza *et al.*, 2011; 葛家旺等, 2021), 由此形成的高可容纳空间为巴一段沉积期半深湖—深湖相沉积体系的发育奠定了基础(图 11-b)。同时, 巴一段沉积期发育长轴向与短轴向扇三角洲体系, 其地震响应表现为加积—退积楔状反射, 证明了初始断陷期高活化断层控制半地堑中沉积物的供给速率低于盆地空间的快速拓展。结合扇体短距离展布(约 5 km), 共同指示物源供给相对不足, 形成欠补偿状态。研究区北部斜

坡长轴向物源可能继承先存成熟水系, 而短轴向朵叶状扇体活动可能与断层分段连接点调节带的形成有关。

巴二段沉积时期, 查干凹陷断层活动呈现继承性发育特征, 图拉格断层与毛西断层活动趋势与巴一段沉积期相似, 但位移量显著增加 (图拉格断层位移量最高达 2500 m, 毛西断层位移量最高达 1500 m), 沉降中心整体向南部迁移。断层位移量与长度协同增大的特征 (图 5-a, 5-b), 指示早期孤立断层通过辐射状扩展相互联结 (Cowie *et al.*, 2000), 保持了断陷的分隔性, 阻碍了周缘水系向盆地中心输送砂体。强烈的断层活动维持了高可容纳空间, 尽管近断层物源 (图拉格断层、毛西断层近端) 供给增强、砂地比 (SGR) 提高, 但受限于分隔性盆地结构, 扇三角洲体系延伸距离依旧较短 (图 11-d)。

此外, 陆相断陷盆地中控陷断层活动虽产生新的可容纳空间, 但其本质是沉积空间的再配置, 而非盆地系统总水量的实质增加 (Ilgar and Nemec, 2005; 操应长, 2005; Feng *et al.*, 2013)。查干凹陷初始断陷期半深湖—深湖相的发育, 指示古气候在调节盆地水量平衡中发挥了关键补偿作用。Y11 井、X13 井等钻井巴音戈壁组底部发育大套灰黑色、黑色泥岩, 指示沉积初期具有高水体注入量。岩心及周缘露头样品中丰富的植物碳屑、黄铁矿及狼鳍鱼化石, 共同支持该时期存在湿润古气候条件 (张坤, 2021)。同时, 研究区西部楚鲁隆起孢粉组合以热带—温带、中生—湿生类型为主, 反映温暖湿润环境。湖相烃源岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 数据揭示其发育可能受到早白垩世 Aptian 期 OAE 1a 全球古气候变暖的影响 (Zhang *et al.*, 2020, 2022)。综合表明, 初始断陷期可容纳空间增加后, 温暖湿润的古气候通过增强大气降水补给和地表径流输入, 有效增加了盆地总水量, 为半深湖—深湖相发育提供了必要条件。

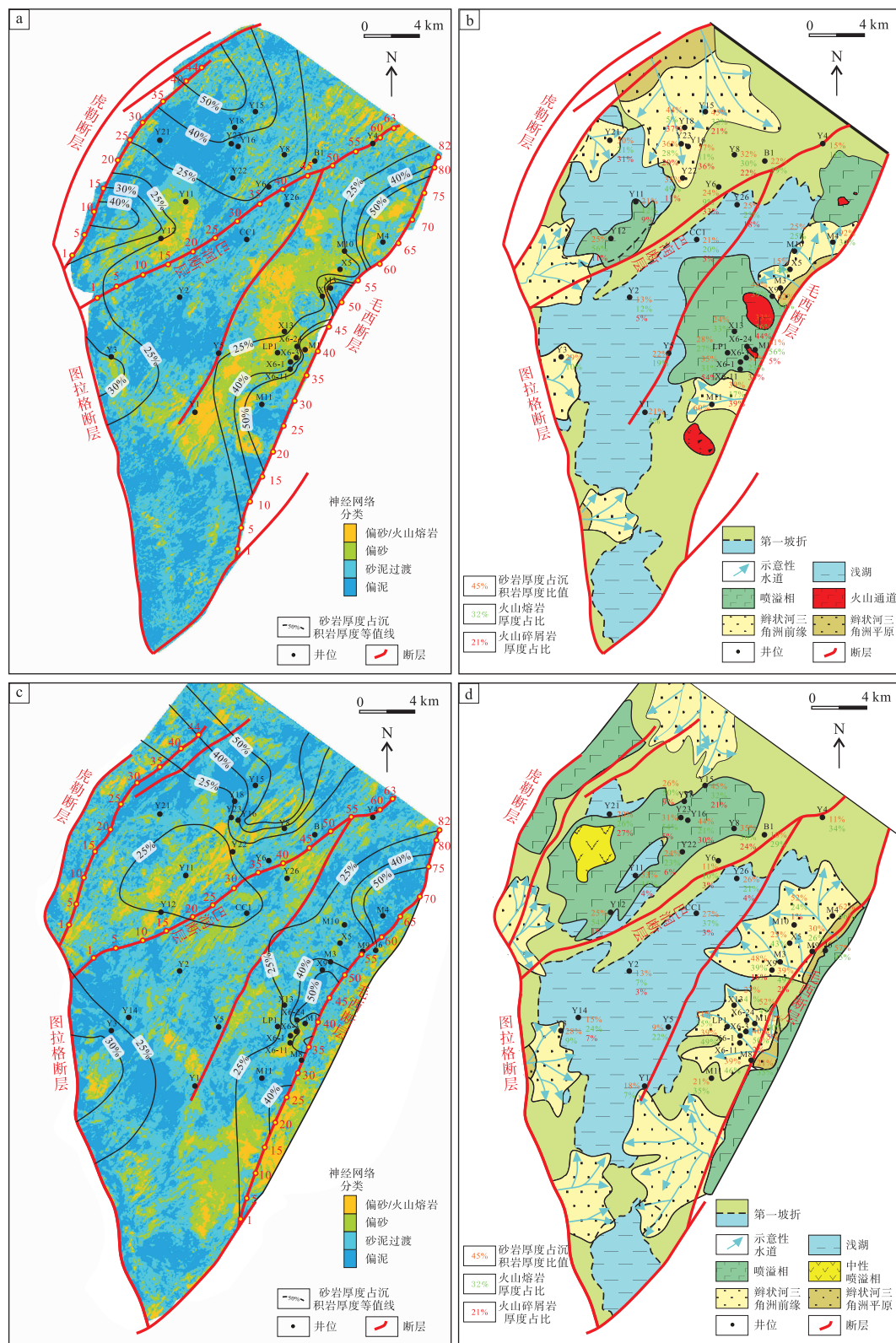
综上, 查干凹陷初始断陷期发育欠补偿的沉积充填模式, 断层活化的高位移量增加了可容纳空间, 温暖湿润古气候条件增加了盆地总水量, 控制了该时期半深湖—深湖沉积体系的发育 (图 13-a, 13-b)。

4.2 强烈断陷期 (SQ2)

查干凹陷强烈断陷期经历了火山—沉积相互作用

控制的特殊源汇过程。苏一段沉积时期, NE 向虎勒断层 (最大位移量 > 1000 m) 与巴润断层 (最大位移量 > 1000 m) 开始控陷活动。毛西断层拓展联结成整一的断层, 但活动性相对减弱 (最大位移量 500 m 左右)。“二强一弱”的断层活动驱动断陷地貌重组, 东倾的虎勒断层与巴润断层导致上盘快速沉降与半地堑旋转, 远离断层下盘区域发生倾斜抬升, 上述过程将断陷分割为东部地堑与西部半地堑 2 部分, 显著限制了沉积物的展布范围 (图 9)。受毛西断层与巴润断层活动控制, 研究区发育小型单成因火山 (体积 < 10 km^3), 喷发中心沿断层走向分布, 主中心位于毛西断层 X6-1 井区及巴润断层 Y22 井区。多期次低黏度玄武质岩浆活动可溢流延伸数十公里 (Planke *et al.*, 2000; 衣健等, 2016) (图 2), 显著改变静水沉积环境, 导致该时期主要发育浅湖沉积体系。火山活动同时还重塑了地形地貌, 火山机构近源相带形成了局部地貌高地, 中远源相带大面积充填显著降低了强烈断陷期的地形起伏, 使盆地整体趋于平缓, 为辫状河三角洲体系的发育创造了有利条件 (图 9)。毛西断层一侧物源供给受限, 仅发育短轴向、短程 (< 5 km) 辫状河三角洲沉积, 断层上盘 X6-1 井区等火山近源相带形成的地貌高地, 阻碍了物源水系携带砂体向断陷内有效迁移 (图 13-c)。同时, 地震剖面上隐伏一前积反射结构表明该时期火山物质充填占据了可容纳空间, 水体较浅, 进一步限制了辫状河三角洲砂体的规模 (图 9)。西部地堑火山机构近源相带形成的地貌高地主要分布于巴润断层附近, 尽管玄武质熔岩可溢流至虎勒断层区域, 但因喷发中心不靠近其上盘, 其充填主要起到降低地形差异的作用 (图 2-a), 虎勒断层调节带控制了物源水系向西部地堑输入砂体, 形成规模性的辫状河三角洲沉积 (图 12-b)。钻井及地震相揭示巴润断层上盘砂体不发育, 主要为浅湖沉积, 这可能与半地堑旋转沉降模式限制沉积物展布, 以及巴润断层附近火山地貌高地阻碍了西部 (虎勒断层方向) 物源跨地堑输送有关。

苏二段沉积时期, 虎勒断层扩展联结形成整一大型边界断层, 巴润断层继承性活动, 毛西断层活动性由南强北弱转变为北强南弱, 控陷断裂体系的变化导致沉积空间重新分配, 虎勒次洼形成单一沉积中心, 毛西断层控制的沉降中心向北迁移 (图 4-



a—苏一段神经网络属性；b—苏一段沉积相；c—苏二段神经网络属性；d—苏二段沉积相

图 12 查干凹陷苏红图组 (SQ2) 神经网络属性与沉积相平面分布

Fig. 12 Plane distribution of neural network attribute classification and sedimentary facies of the Suhongtu Formation (SQ2) in Chagan sag

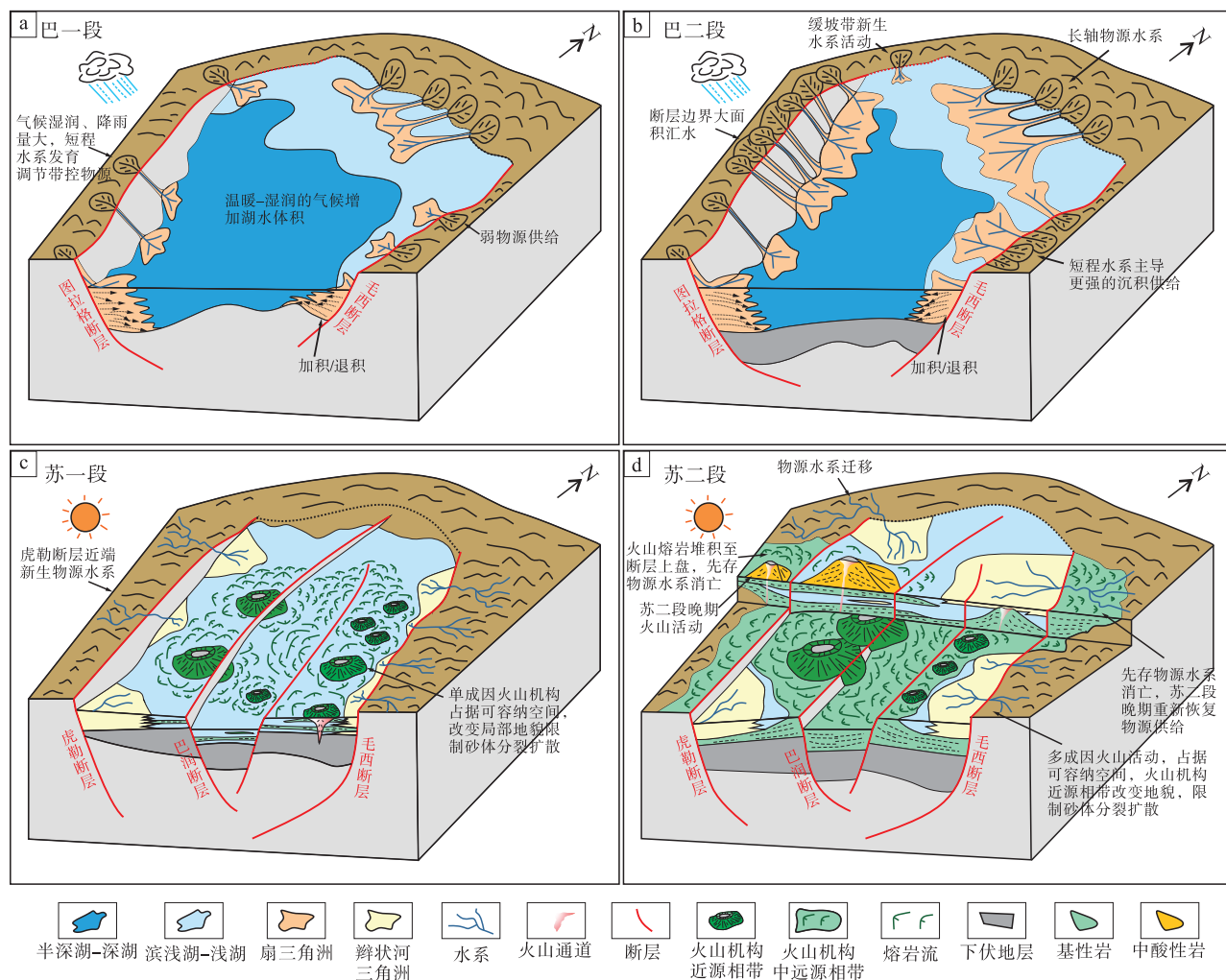


图 13 查干凹陷巴音戈壁组与苏红图组构造-沉积演化模式

Fig. 13 Tectonic-sedimentary evolutionary model of the Bayingebi and Suhongtu Formations in Chagan sag

b.)。苏二段充填始于强烈的火山喷发，毛西断层、巴润断层控制着规模更大（体积 $>10\text{ km}^3$ ）的多成因火山活动，毛西断层主喷发中心迁移至北段，巴润断层主喷发中心则继承苏一段位置（Y12井区、Y16井区附近）（图 2-b）。以中基性熔岩为主的多成因盾状火山广泛覆盖研究区，短时间内巨量火山物质充填，使得虎勒断层、毛西断层近端火山堆积速率超越断陷沉降速率，导致岩浆溢流并超覆侵位至毛西断层下盘（图 2；图 9）。受毛西断层北强南弱活动性影响，北部 X5 井区、M10 井区附近发育火山近源相带，堆积厚层火山物质形成显著地貌高地。超覆至下盘的熔岩流直接阻断了局部物源供给系统（图 2-b）。地震相分析表明，现今识别出的该区辫状河三角洲砂体主要形成于苏二段沉积晚期，代表毛西断层在火山活动减弱后新恢复

的物源水系所输送的沉积产物（图 9；图 12-d）。同时，毛西断层中一南段与北段相比火山地层厚度显著减薄，火山物质充填未完全占据沉积可容纳空间，使得苏二段早期火山活动减弱后，物源水系得以快速恢复，进而控制了辫状河三角洲的发育（图 2-b）。虎勒洼陷大规模火山物质充填占据洼陷内大量可容纳空间，显著降低了地形坡度和水体深度，导致浅湖沉积体系活跃。而且下盘堆积的火山物质阻碍了先存物源水系，迫使物源供给系统调整为从北西方向输入，形成辫状河三角洲沉积。该三角洲延伸至巴润断层上盘斜坡区，但受巴润断层附近大型火山地貌高地阻隔，砂体无法跨地堑输送，致使巴润断层上盘持续处于贫砂沉积环境（图 12-c，12-d）。苏二段沉积晚期，虎勒断层控制了晚期火山活动，大规模基性熔岩在西部地堑堆

积形成厚层熔岩台地,部分熔岩流溢流至额很洼陷内部(图 2-a),同时,该阶段规模性火山岩体超覆至虎勒断层下盘,占据了苏红图组晚期火山活动后虎勒断层附近的剩余可容纳空间,导致该区域后续不再具备发育大型砂体的沉积条件。

综上,查干凹陷强烈断陷期受火山—构造作用影响降低了可容纳空间,改变了局部的沉积地貌,限制、改造周缘水系物源供给,改变了沉积碎屑物质在断陷内部的充填过程(图 13-c, 13-d)。

5 油气地质意义

油气勘探进程的不断深入,断陷盆地的勘探已从中浅层向深层拓展。以海拉尔盆地、松辽盆地等断陷盆地为例,其初始断陷期多发育富砾富砂的粗碎屑补偿沉积,与上覆强烈断陷期的湖相烃源岩可形成“旁生侧储”和“上生下储”的典型成藏组合(沈华等, 2023; 王小军等, 2024)。然而,查干凹陷的勘探实践表明,在特殊的气候—构造耦合作用控制下,初始断陷期也可以发育规模湖相烃源岩,从而形成“源内成藏”或“下生上储”的成藏模式,其良好的油气资源潜力也被证实,这一案例丰富了断陷盆地成藏模式的认识,为断陷盆地的油气勘探提供了新的思路 and 方向。与许多断陷盆地在强烈断陷期发育优质烃源岩不同,查干凹陷在强烈断陷期受到多期次火山作用改造,影响了深湖相沉积的发育及有机质的保存与富集,并多阶段改变了沉积地貌,限制了沉积砂体的发育规模。苏一段沉积时期虎勒断层北段发育大型三角洲,但在苏二段早期火山活动后迁移至西北方向,而凹陷东部规模较大的三角洲沉积则是在苏二段晚期火山活动后才开始发育,这些砂体发育区域与后期的断裂活动耦合可以沟通深部油源成为油气聚集的有利区。同时,苏红图组发育多期次玄武岩,其顶界面发育的层状气孔带也可形成优质储集层(衣健等, 2016; 王璞珺等, 2018; 单玄龙等, 2023),通过断层与巴音戈壁组烃源岩直接连通的火山机构近源相带也是查干凹陷油气勘探的潜在目标。

6 结论

1) 银额盆地查干凹陷下白垩统巴音戈壁组和苏红图组发育初始断陷期(SQ1)和强烈断陷期

(SQ2) 2 个完整的三级层序。初始断陷期巴音戈壁组以扇三角洲与深水沉积体系为主;强烈断陷期苏红图组则以辫状河三角洲与浅水沉积体系为主,间歇发育多期次火山岩,构成了碎屑岩沉积与火山岩复合充填体系。

2) 银额盆地查干凹陷初始断陷期气候—构造条件与沉积体系发育的响应关系密切。毛西断层与图拉格断层的高位移量活动显著增加了可容纳空间,温暖湿润的古气候条件增加了盆地的总水量,相对分隔的古地貌导致物源供给受限,形成了欠补偿的沉积充填模式,发育了 1 套规模有效的湖相烃源岩。

3) 银额盆地查干凹陷强烈断陷期火山—构造活动对沉积充填格局产生了显著影响。苏一段沉积时期,毛西断层与巴润断层控制的小型火山机构充填占据了大量可容纳空间,导致浅水沉积体系发育,造成的地形起伏限制了辫状河三角洲沉积体系的分裂与迁移;苏二段沉积早期,毛西断层与巴润断层控制的大型火山机构占据可容纳空间使湖盆水体变浅,同时也限制并改造了周缘的物源水系供给;苏二段沉积晚期,虎勒断层控制的大型火山机构导致其西侧的物源体系消亡,辫状河三角洲砂体主要分布在东部额很洼陷内。

参考文献(References)

- 操应长. 2005. 断陷湖盆中强制湖退沉积作用及其成因机制. 沉积学报, 23(1): 84-90. [Cao Y C. 2005. Sedimentation and its forming mechanism of the forced lacustrine regression in the rift lacustrine basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(1): 84-90]
- 陈发景, 汪新文, 陈昭年. 2011. 不同期伸展断陷的叠合类型. 现代地质, 25(5): 889-895. [Chen F J, Wang X W, Chen Z N. 2011. Superimposed types of extensional fault depressions at different epochs. *Geoscience*, 25(5): 889-895]
- 陈志鹏, 任战利, 祁凯, 于春勇, 任文波. 2019. 银额盆地苏红图坳陷早白垩世巴音戈壁组火山岩锆石 U-Pb 年代学、地球化学特征及构造意义. 地质学报, 93(2): 353-367. [Chen Z P, Ren Z L, Qi K, Yu C Y, Ren W B. 2019. Zircon U-Pb chronology and geochemistry of volcanic rocks of Early Cretaceous Bayingebi Formation in Suhongtu Depression of the Yin'e Basin, and their tectonic implications. *Acta Geologica Sinica*, 93(2): 353-367]
- 崔映坤, 鲍志东, 李忠诚, 赵家宏, 姜福杰, 王天煦, 韩昊天, 姜振昌, 王腾宇. 2025. 松辽盆地扶新隆起带南部扶余油层浅水曲流河三角洲沉积与演化特征. 古地理学报, 27(5): 1207-1226. [Cui Y K, Bao Z D, Li Z C, Zhao J H, Jiang F J, Wang T X, Han H T, Jiang Z C, Wang T Y. 2025. Sedimentary characteristics and evolution of

- shallow-water meandering river delta in Fuyu oil layer, southern Fuxin uplift zone, Songliao Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(5): 1207-1226]
- 崔海峰, 侯艳, 鲁如魁. 2023. 银额盆地现今结构及油气勘探启示. *中国石油勘探*, 28(1): 83-93. [Cui H F, Hou Y, Lu R K. 2023. Current structure of Yingen-Ejinaqi Basin and enlightenments for petroleum exploration. *China Petroleum Exploration*, 28(1): 83-93]
- 单玄龙, 王蔚, 张新涛, 衣健, 徐春强, 岳军培, 刘鹏程, 傅锚. 2023. 渤海海域渤中凹陷中生界火山机构地质模式及建造过程. *石油与天然气地质*, 44(3): 675-688. [Shan X L, Wang W, Zhang X T, Yi J, Xu C Q, Yue J P, Liu P C, Fu M. 2023. Geological model and construction process of the Mesozoic volcanic edifices in Bozhong sag, Bohai Sea. *Oil & Gas Geology*, 44(3): 675-688]
- 葛家旺, 朱筱敏, 雷永昌, 于福生. 2021. 多幕裂陷盆地构造-沉积响应及陆丰凹陷实例分析. *地学前缘*, 28(1): 77-89. [Ge J W, Zhu X M, Lei Y C, Yu F S. 2021. Tectono-sedimentary development of multiphase rift basins: an example of the Lufeng Depression. *Earth Science Frontiers*, 28(1): 77-89]
- 葛家旺, 朱筱敏, 王瑞, 谈明轩, 赵晓明. 2022. 裂陷盆地初始阶段构造-沉积协同机制: 以蒙古塔木察格盆地塔南凹陷铜钵庙组为例. *沉积学报*, 40(6): 1582-1598. [Ge J W, Zhu X M, Wang R, Tan M X, Zhao X M. 2022. Tectono-sedimentary interaction of early syn-rift successions: a case study from the Tobomiao Formation, Tanan Depression, Tamtsag Basin, Mongolia. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(6): 1582-1598]
- 刘玉虎, 曹春辉, 李瑞磊, 朱建峰, 徐文, 黄兰, 栾颖. 2020. 边界断裂时空差异演化对断陷盆地的控制作用: 以松辽盆地南部伏龙泉断陷为例. *地球科学进展*, 35(1): 79-87. [Liu Y H, Cao C H, Li R L, Zhu J F, Xu W, Huang L, Luan Y. 2020. The control of the spatial and temporal differential evolution of boundary faults on faulted basins: taking the Fulongquan fault Depression in the southern Songliao Basin as an example. *Advances in Earth Science*, 35(1): 79-87]
- 牛子铖, 柳广弟, 曹喆, 王朋, 常俊合, 张凯迪. 2016. 银额盆地查干凹陷油藏特征及油气成藏过程. *石油实验地质*, 38(1): 32-39, 107. [Niu Z C, Liu G D, Cao Z, Wang P, Chang J H, Zhang K D. 2016. Reservoir characteristics and hydrocarbon accumulation in Chagan sag, Yingen-Ejinaqi Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 38(1): 32-39, 107]
- 漆家福. 2007. 裂陷盆地中的构造变换带及其石油地质意义. *海相油气地质*, 12(4): 43-50. [Qi J F. 2007. Structural transfer zones and significance for hydrocarbon accumulation in rifting basins. *Marine Origin Petroleum Geology*, 12(4): 43-50]
- 沈华, 杨亮, 韩昊天, 王颖, 邢济麟, 薛松, 刘红超. 2023. 松辽盆地南部油气勘探新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 44(12): 2104-2121. [Shen H, Yang L, Han H T, Wang Y, Xing J L, Xue S, Liu H C. 2023. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in southern Songliao Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 44(12): 2104-2121]
- 史大海, 陈清荣, 邱微, 郭展, 吴小琴. 2013. 查干凹陷乌力吉构造带浅层成藏主控因素. *断块油气田*, 20(3): 321-323, 328. [Shi D H, Chen Q T, Qiu W, Guo Z, Wu X Q. 2013. Main controlling factors on shallow hydrocarbon accumulation of Wuliji tectonic zone, Chagan Depression. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 20(3): 321-323, 328]
- 宋健. 2020. 海拉尔-塔木察格盆地塔南凹陷变形特征及对地质演化的构造响应. 吉林大学博士学位论文. [Song J. 2020. Multi-stage structural deformations of the Tanan Depression in Hailar-Tamtsag Basin and its tectonic response to regional geological evolution. Doctoral dissertation of Jilin University]
- 陶国强. 2003. 查干德勒苏凹陷构造特征及油气成藏条件. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Tao G Q. 2003. The structure characteristics of Chagandelezu fault Depression and its petroleum accumulation condition. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 王璞珺, 何凯伦, 衣健, 王寒非, 孙松, 陈海潮. 2018. 中基性岩系火山地层、架构和储层: 松辽盆地埋藏古火山与长白山现代火山对比研究. *石油物探*, 57(5): 775-787. [Wang P J, He K L, Yi J, Wang H F, Sun S, Chen H C. 2018. Volcanostratigraphy, volcanic architecture and reservoir of intermediate-mafic volcanic rocks: a comparison between buried Cretaceous volcanoes in the Songliao Basin and the modern volcanoes in Changbai Mountain. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 57(5): 775-787]
- 卫平生, 张虎权, 陈启林. 2006. 银根-额济纳旗盆地油气地质特征及勘探前景. 北京: 石油工业出版社. [Wei P S, Zhang H Q, Chen Q L. 2006. Oil and Gas Geological Characteristics and Exploration Prospect in Yingen-Ejinaqi Basin. Beijing: Petroleum Industry Press]
- 王小军, 蒙启安, 李跃, 吴海波, 李军辉, 邓海, 申文静, 陈方举, 侯思宇, 张守庆. 2024. 海拉尔盆地油气勘探开发新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 45(1): 99-114. [Wang X J, Meng Q A, Li Y, Wu H B, Li J H, Deng H, Shen W J, Chen F J, Hou S Y, Zhang S Q. 2024. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration and development in Hailar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 99-114]
- 魏巍, 朱筱敏, 谈明轩, 吴陈冰洁, 薛梦戈, 国殿斌, 蒋飞虎, 吕思翰. 2017. 查干凹陷早白垩世热流体活动的证据及其对巴音戈壁组碎屑岩储层的影响. *石油与天然气地质*, 38(2): 270-280. [Wei W, Zhu X M, Tan M X, Wu C B J, Xue M G, Guo D B, Jiang F H, Lyu S H. 2017. The Early Cretaceous thermal fluid activities and their impacts on elastic reservoir rocks in the Bayingebi Formation of Chagan sag. *Oil & Gas Geology*, 38(2): 270-280]
- 杨国臣, 焦大庆, 肖斌, 陈明权, 刘建军, 王彦丽. 2013. 内蒙古银额盆地查干凹陷构造-层序-沉积特征、盆地原型及其成因机制. *古地理学报*, 15(3): 305-316. [Yang G C, Jiao D Q, Xiao B, Chen M Q, Liu J J, Wang Y L. 2013. Tectono-sequence-sedimentary characteristics, basin prototypes and their genetic mechanisms in Chagan sag of Yin-E Basin, Inner Mongolia. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 15(3): 305-316]
- 叶蕾, 朱筱敏, 谢爽慧, 杨棵, 张美洲, 秦祎. 2023. 沉积古地貌基本恢复方法及实例研究: 以饶阳凹陷沙一段为例. *古地理学报*, 25(5): 1139-1155. [Ye L, Zhu X M, Xie S H, Yang K, Zhang M

- Z, Qin Y. 2023. Restoration methods of sedimentary palaeogeomorphology and applications: a case study of the First Member of Paleogene Shahejie Formation in Raoyang sag. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 25(5): 1139–1155]
- 衣健, 唐华风, 王璞珺, 高有峰, 赵然磊. 2016. 基性熔岩火山地层单元类型、特征及其储层意义. *中南大学学报(自然科学版)*, 47(1): 149–158. [Yi J, Tang H F, Wang P J, Gao Y F, Zhao R L. 2016. Types, characteristics and reservoir significance of basic lava flow units. *Journal of Central South University(Science and Technology)*, 47(1): 149–158]
- 张洪安, 李令喜, 陈清棠, 万晶, 史大海, 彭国桃, 周勇水. 2024. 银额盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力. *石油学报*, 45(1): 147–162. [Zhang H A, Li L X, Chen Q T, Wan J, Shi D H, Peng G T, Zhou Y S. 2024. New fields, new types and resource potentials of oil-gas exploration in Yin'gen-Ejinaqi Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(1): 147–162]
- 张坤. 2021. 银额盆地楚鲁隆起巴音戈壁组含油页岩系有机质富集机制研究. 吉林大学博士学位论文. [Zhang K. 2021. Study on the mechanism of organic matter enrichment in the oil shale-bearing series of the Bayingebi Formation in Chulu uplift, Yin'e Basin. Doctoral dissertation of Jilin University]
- 赵贤正, 柳广弟, 金凤鸣, 黄志龙, 卢学军, 孙明亮, 丁修建, 陈哲龙. 2015. 小型断陷湖盆有效烃源岩分布特征与分布模式: 以二连盆地地下白垩统为例. *石油学报*, 36(6): 641–652. [Zhao X Z, Liu G D, Jin F M, Huang Z L, Lu X J, Sun M L, Ding X J, Chen Z L. 2015. Distribution features and pattern of effective source rock in small faulted lacustrine basin: a case study of the Lower Cretaceous in Erlian Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36(6): 641–652]
- 钟福平, 钟建华, 由伟丰. 2011. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩幔源特征. *地质学报*, 85(12): 2003–2013. [Zhong F P, Zhong J H, You W F. 2011. Characteristics of the Early Cretaceous mantle-derived volcanic rocks in the Suhogntu Depression of Inggen-Ejinaqi Basin. *Acta Geologica Sinica*, 85(12): 2003–2013]
- 周勇水, 李红磊, 史大海, 陈帆. 2021. 银根—额济纳旗盆地烃源岩特征及油气富集规律. *石油学报*, 42(8): 1026–1038. [Zhou Y S, Li H L, Shi D H, Chen F. 2021. Characteristics of source rocks and enrichment laws of hydrocarbons in Yin'gen-Ejinaqi Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 42(8): 1026–1038]
- Corti G. 2009. Continental rift evolution: from rift initiation to incipient break-up in the Main Ethiopian Rift, East Africa. *Earth-Science Reviews*, 96: 1–53.
- Cowie P A, Gupta S, Dawers N H. 2000. Implications of fault array evolution for synrift depocentre development: insights from a numerical fault growth model. *Basin Research*, 12: 241–261.
- Feng Y L, Li S T, Lu Y C. 2013. Sequence stratigraphy and architectural variability in Late Eocene lacustrine strata of the Dongying Depression, Bohai Bay Basin, Eastern China. *Sedimentary Geology*, 295: 1–26.
- Fossen H, Rotevatn A. 2016. Fault linkage and relay structures in extensional settings: a review. *Earth-Science Reviews*, 154: 14–28.
- Gawthorpe R L, Leeder M R. 2000. Tectono-sedimentary evolution of active extensional basins. *Basin Research*, 12: 195–218.
- Henza A A, Withjack M O, Schlische R W. 2011. How do the properties of a pre-existing normal-fault population influence fault development during a subsequent phase of extension? *Journal of Structural Geology*, 33(9): 1312–1324.
- Ilgar A, Nemec W. 2005. Early Miocene lacustrine deposits and sequence stratigraphy of the Ermenek Basin, Central Taurides, Turkey. *Sedimentary Geology*, 173: 233–275.
- Liu C Y, Li H Y, Xu Y G, Ma Q, Yang C, Zhang W F. 2025. Geochemical evidence of paleo-Pacific slab melting in the big mantle wedge beneath Northeast China during the Early Cretaceous. *Chemical Geology*, 683: 122771.
- Niu Z C, Liu G D, Cao Z, Guo D B, Wang P, Tang G. 2018. Geochemical characteristics, depositional environment, and controlling factors of Lower Cretaceous shales in Chagan sag, Yingen-Ejinaqi Basin. *Geological Journal*, 53(4): 1308–1321.
- Planke S, Symonds P A, Alvestad E, Skogseid J. 2000. Seismic volcanostratigraphy of large-volume basaltic extrusive complexes on rifted margins. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105: 19335–19351.
- Prosser S. 1993. Rift-related linked depositional systems and their seismic expression. *Geological Society, London, Special Publications*, 71: 35–66.
- Tan M X, Zhu X M, Wei W, Wu C, Pan R. 2018. The sequence stratigraphy and depositional characteristics of fan-delta complexes in the Upper Bayingebi Member (Lower Cretaceous) in Chagan sag, Inner Mongolia, China. *Geological Journal*, 53(1): 349–370.
- Tan M X, Zhu X M, Wei W, Pan R. 2021. Characteristics and implications of Albion volcanism in a *Magma*-rich rift basin: seismic volcano stratigraphic and geomorphological evidence from the Upper Suhongtu Member in the Chagan sag, China-Mongolia border region. *Marine and Petroleum Geology*, 131: 105164.
- Zhang K, Liu R, Liu Z J, Li L, Wu X P, Zhao K G. 2020. Influence of palaeoclimate and hydrothermal activity on organic matter accumulation in lacustrine black shales from the Lower Cretaceous Bayingebi Formation of the Yin'e Basin, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 560: 110007.
- Zhang K, Liu R, Liu Z J, Li B L, Liu G F, Yan X, Li L. 2022. Terrestrial records of Early Cretaceous paleoclimate fluctuations in the Yin'e Basin, northern China: evidence from sedimentology and palynomorphs in lacustrine sediments. *Sedimentary Geology*, 432: 106110.
- Zheng Y F, Xu Z, Zhao Z F, Dai L Q. 2018. Mesozoic mafic magmatism in North China: implications for thinning and destruction of cratonic lithosphere. *Science China Earth Sciences*, 61: 353–385.
- Zuo Y H, Jiang S, Wu S H, Xu W, Zhang J, Feng R P, Yang M H, Zhou Y S, Santosh M. 2020. Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the Chagan Depression of the Yingen-Ejinaqi Basin, north Central China. *Basin Research*, 32(6): 1328–1346.

(责任编辑 王绍华)