

古地貌—物源—湖平面演化对砂体分布的控制作用： 以准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组为例^{*}

徐 杰^{1,2,3} 李 攀⁴ 温九存⁵ 马 强⁶
陈贺贺^{1,2,3} 刘长鹏^{1,2,3} 张 伟⁶

1 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083

2 中国地质大学(北京)极地地质与海洋矿产教育部重点实验室, 北京 100083

3 中国地质大学(北京)海南研究院, 海南三亚 572000

4 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

5 中石化胜利油田, 山东东营 257000

6 中国石油吐哈油田研究院, 新疆哈密 839009

摘 要 准噶尔盆地阜康凹陷中二叠统芦草沟组油气资源潜力巨大, 但优质储集砂体的分布规律及控制机制尚不明确, 制约着深层油气勘探的突破。本研究综合利用岩心、测录井、地震、岩石薄片、重矿物等资料, 系统探讨湖平面波动、物源及古地貌演化对沉积相带和砂体分布的控制作用。砂岩薄片鉴定表明芦草沟组具有高岩屑—低石英含量、骨架颗粒呈棱角—次棱角状, 反映近源搬运特征。重矿物组合、主成分分析和聚类分析进一步识别出北部白家海、东北部北三台和西泉鼻隆 3 个主要物源区。基于地震剖面 and 钻测井资料识别层序和体系域界面特征, 将芦草沟组划分为低位、湖侵和高位 3 个体系域。低位域时期阜康凹陷中央以湖底扇和半深湖沉积为主, 凹陷边缘发育扇三角洲。湖侵域时期湖盆扩大, 阜康凹陷以半深湖—深湖泥岩沉积为主, 湖底扇与扇三角洲沉积范围缩小。高位域时期湖平面趋稳, 持续的沉积充填使沉积地形平缓, 早期隆起逐渐转化为水下低凸起, 广泛发育滨浅湖滩坝沉积。基于以上认识, 本次研究提出古地貌—物源—湖平面波动共同控制下的动态控砂机制: (1) 物源分析表明阜康凹陷芦草沟组碎屑沉积物为近源搬运堆积, 受盆内北三台凸起、白家海凸起等构造高地控制; (2) 阜康凹陷古地貌恢复表明芦草沟沉积时期存在稳定隆起区、间歇性隆起区、斜坡区和深洼区, 不同地貌单元发育不同的优势相带; (3) 湖平面升降通过调节可容纳空间和地形相对坡度, 促使低位域发育大规模湖底扇砂体, 湖侵域以细粒沉积为主, 高位域过渡为扇三角洲—滨浅湖—滩坝沉积。该“古地貌—物源—湖平面”动态控砂模式揭示了优质砂体的形成与分布规律, 为阜康凹陷深层储集层发育机制与勘探预测提供理论支撑, 也为相似背景的陆相盆地研究提供参考。

关键词 阜康凹陷 芦草沟组 物源 古地貌 湖平面演化 控砂机制 湖底扇

第一作者简介 徐杰, 男, 1985 年生, 中国地质大学(北京)海洋学院副教授, 主要从事沉积学、沉积盆地源—汇系统分析和海洋地质方面的教学和科学研究工作。E-mail: jiexu@cugb.edu.cn。

中图分类号: P539.2; TE121.3 文献标志码: A

Palaeogeomorphology—provenance—lake-level evolution controls on sand-

^{*} 中国地质大学(北京)海南研究院培育项目(编号: HNPY-202501)、国家自然科学基金(编号: 41902108)、中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号: 2023ZZ24YJ01)联合资助。[Co-funded by the Hainan Institute of China University of Geosciences (Beijing) (No. HNPY-202501), the National Natural Science Foundation of China (No. 41902108) and the PetroChina Science and Technology Project (No. 2023ZZ24YJ01)]

收稿日期: 2025-11-23 改回日期: 2026-04-27

body distribution: a case study of the Middle Permian Lucaogou Formation in Fukang Sag, Junggar Basin

XU Jie^{1,2,3} LI Pan⁴ WEN Jiucun⁵ MA Qiang⁶ CHEN Hehe^{1,2,3}
LIU Changpeng^{1,2,3} ZHANG Wei⁶

1 School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

2 Key Laboratory of Polar Geology and Marine Mineral Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China

3 Hainan Institute of China University of Geosciences (Beijing), Hainan Sanya 572000, China

4 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

5 Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Shandong Dongying 257000, China

6 Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Tuha Oilfield Company, Xinjiang Hami 839009, China

Abstract The Fukang Sag of Junggar Basin has huge hydrocarbon potential in the Middle Permian Lucaogou Formation, yet the distribution patterns and controlling mechanisms of high-quality reservoir sand bodies remain unclear, constraining breakthroughs in deep exploration. This study integrates cores, mud logging and wireline logs, seismic data, thin sections, and heavy-mineral datasets to systematically investigate how lake-level fluctuations, sediment provenance, and palaeogeomorphic evolution control facies belts and sand-body distribution. Petrographic analysis of sandstone thin sections shows high lithic and low quartz contents, with framework grains predominantly angular to subangular, indicating short transport distances and proximal deposition. Heavy-mineral assemblages, together with principal component and cluster analyses, further identify three main provenance areas: Baijiahai uplift to the north, Beisantai to the northeast, and the Xiquan nose uplift. Based on recognition of sequence and systems tract boundaries from seismic sections and well logs, the Lucaogou Formation is subdivided into three systems tracts: lowstand, transgressive, and highstand system tract. During the lowstand, sublacustrine fans and semi-deep-lake deposits dominated the sag center, whereas fan deltas developed along the marginal uplift. During the transgressive stage, the lake expanded and the Fukang Sag was dominated by semi-deep to deep-lake mudstone deposition, while the areal extent of sublacustrine fans and fan deltas decreased. During the highstand, lake level became relatively stable and continued sediment infilling and uplift erosion smoothed the depositional topography. Early inherited uplifts gradually evolved into submerged low relief highs, and shore-shallow lake beach-bar deposits became widespread. On this basis, we propose a dynamic sand-distribution mechanism jointly controlled by palaeogeomorphology, provenance, and lake-level fluctuations: (1) provenance analysis indicates that clastic sediments of the Lucaogou Formation in the Fukang Sag were deposited close to source areas and were strongly influenced by intrabasinal structural highs such as the Beisantai, Baijiahai and Xiquan uplifts; (2) palaeogeomorphic reconstruction suggests four types of topography, including persistent uplift zones, intermittent uplift zones, slope belts, and deep-depression areas, which regulate the sediments and facies distribution; and (3) lake-level rise and fall regulated accommodation and the topographic gradient, promoting development of large-scale sublacustrine-fan sand bodies during the lowstand, fine-grained deposition during the transgression, and a shift toward fan delta, shore-shallow lake, beach-bar systems during the highstand. This “paleogeomorphology-provenance-lake-level” dynamic sand-control model clarifies the formation and distribution of high-quality sand bodies, provides a theoretical basis for understanding deep reservoir development, guiding exploration prediction in the Fukang Sag, and offers a

reference for studies of analogous continental basins.

Key words Fukang Sag, Lucaogou Formation, provenance, palaeogeomorphology, lake-level evolution, sandbody-control mechanism, sublacustrine fan

About the first author XU Jie, born in 1985, is an associate professor at the School of Ocean Sciences, China University of Geosciences (Beijing). He is mainly engaged in research and teaching of sedimentology, source-to-sink sedimentary systems and marine geology. E-mail: jiexu@cugb.edu.cn.

0 引言

源-汇系统是盆地分析中的重要组成部分, 其将沉积物从物源区的剥蚀产出、经河流与风等媒介的搬运, 到沉积盆地中的堆积视为一个完整的地表动力学过程, 涵盖物源供给、搬运路径与沉积记录响应 3 个端元 (Allen, 2008; 林畅松等, 2015; Helland-Hansen *et al.*, 2016; 操应长等, 2018; 邵龙义等, 2019)。相较海相源-汇系统中相对清晰的单元边界与较稳定的构造背景, 陆相湖盆源-汇系统常表现为近源、多物源混合、构造分异强以及汇水盆地受限等特征, 从而导致源端信号在路径系统中的传递与在汇区的沉积响应更为复杂 (姜在兴, 2010; 张志杰等, 2023; 朱筱敏等, 2023)。在陆相湖盆演化的不同阶段, 盆地内部隆起的近源供给与盆地边缘或外部的远源供给常呈现共同供源或交替供源的格局 (朱红涛等, 2017)。如何有效区分不同来源的沉积物供给, 对认识陆相盆地沉积体系及优质储集层发育规律具有重要指示意义 (Vincent *et al.*, 2014; 徐长贵等, 2017; 刘强虎等, 2023; 朱筱敏等, 2023)。尤其是盆地内部发育的局部隆起 (如低凸起、凸起倾没端等小型正向构造单元), 近年来被证实可提供粗粒碎屑, 并在其周缘形成优质储集层发育区 (杜晓峰等, 2017; Yang *et al.*, 2023)。

准噶尔盆地自二叠纪起进入陆相湖盆演化阶段, 多期构造活动持续影响其沉积格局与物源体系 (何登发等, 2018; Wang *et al.*, 2021; 曹正林等, 2024)。准噶尔盆地东南缘二叠纪物源复杂, 既可能来自盆地东部的盆内隆起, 也可能由克拉美丽山与依林黑比尔根山等区域性物源区主导 (Wang *et al.*, 2018, 2019; 徐琦松, 2019; 史燕青, 2020; 武向峰, 2020)。复杂的构造背景与物源特征导致对阜康凹陷芦草沟组的物源与沉积格局存在不同认识。前人准东区域性研究认为芦草沟组砂质沉积物主要来自东缘北部克拉美丽山

与南部天山, 盆内隆起供源有限 (杨有星等, 2022), 但这一观点缺少对阜康凹陷内部古地貌格局与沉积物搬运路径的精细约束。基于露头沉积学与古水流研究, 有学者提出博格达山一带可能为二叠纪芦草沟组时期的沉积中心, 并据此推断南部依林黑比尔根山物源难以大规模跨越该沉积中心进入阜康凹陷 (李玮等, 2007; 王新桐, 2017)。此外, 徐琦松 (2019) 进一步指出中二叠世准东地区发育多列盆内隆起, 这些构造高地既可能对北部物源输送形成阻挡, 也可能作为局部供源区向周缘提供碎屑物质。基于上述认识差异, 盆内古隆起的时空演化及其对沉积物搬运路径与砂体展布的控制机制亟须进一步厘清。

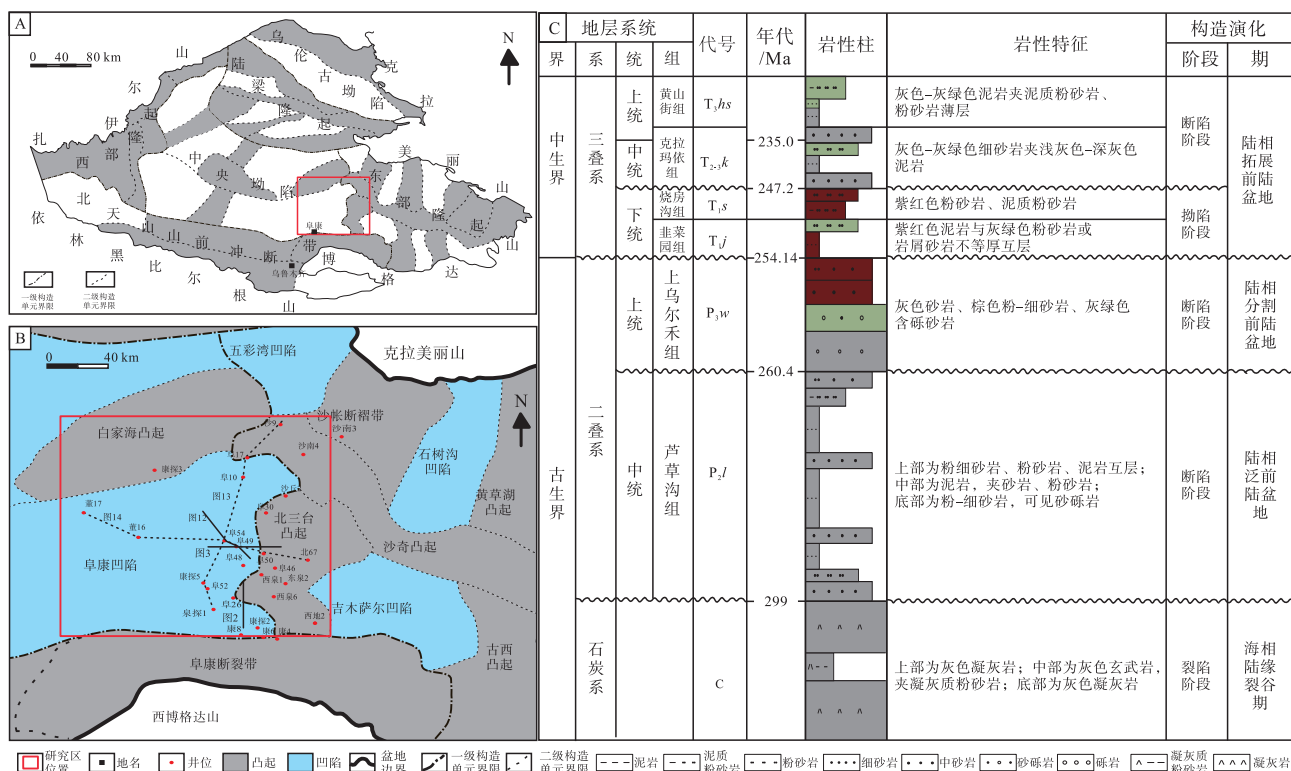
准噶尔盆地深层二叠系已显示出良好的勘探潜力, 其中阜康凹陷芦草沟组是该区的优质烃源岩, 但目前对沉积体系、岩相古地理及源-汇控制因素的刻画相对不足, 从而制约了优质砂岩储集层的预测。鉴于古地貌与物源特征对砂体规模与物性具有重要控制作用 (Vincent *et al.*, 2014; 曹正林等, 2024), 有必要在层序格架约束下开展高分辨率源-汇系统重建。

基于上述问题, 本研究以阜康凹陷中二叠统芦草沟组为研究对象, 综合岩心、测录井、地震、薄片与重矿物等资料, 在层序地层格架约束下重建物源-古地貌-湖平面变化与砂体沉积响应之间的耦合关系。

1 区域地质概况

1.1 地理位置与构造背景

准噶尔盆地处于哈萨克斯坦古板块、西伯利亚古板块和塔里木古板块的结合部。阜康凹陷位于准噶尔盆地中央坳陷与东部隆起区之间的过渡地区, 北接白家海凸起, 东邻沙奇凸起、北三台凸起, 南抵博格达山前阜康断裂带 (图 1-A, 1-B)。准噶尔



A—准噶尔盆地及研究区阜康凹陷位置；B—阜康凹陷及周缘构造单元及研究井位、剖面位置；

C—阜康凹陷石炭系—三叠系综合地层柱状图（据张逊，2020；有修改）

图 1 准噶尔盆地阜康凹陷区域概况

Fig. 1 Regional geological background of Fukang Sag, Junggar Basin

盆地周缘受新生代活化造山体体系围限，形成典型的盆—山构造耦合系统：西北侧发育哈拉阿拉特山走滑断裂带，东北缘为阿尔泰—克拉美丽古生代缝合带，南部受控于博格达山前逆冲推覆构造，西南部则毗邻北天山薄皮冲断体系。自晚石炭世以来，在陆内伸展—拗陷动力学机制驱动下，盆地持续堆积厚达 8~12 km 的陆源碎屑建造，以冲积扇—湖泊相砂泥岩互层为主体，局部发育膏盐层。这种强周缘构造活动—弱盆内变形的动力学配置，叠加古水文封闭效应，最终塑造了中国西北部独具特色的压扭性封闭沉积盆地，其成因与古亚洲洋闭合后的板内应力调整及地幔上涌引发的岩石圈减薄密切相关（李涛等，2008；陈正乐等，2010）。

准噶尔地区自太古代以来经历了长期而复杂的构造演化过程，最终形成现今盆岭相间的盆山格局。综合区域地质与地球物理资料，普遍认为其构造演化可概括为 3 个主要阶段（王元龙和成守德，2001；李涤，2016）。第一阶段前震旦纪为联合古陆及大陆基底形成阶段，太古代—早元

古代古老陆核的存在已为地球物理与年代学资料所证实，为后期盆地发育奠定了刚性基底。第二阶段震旦纪—石炭纪为古亚洲洋洋陆转化阶段，联合古陆经历多次裂解—聚合旋回，石炭纪周缘板块碰撞导致古亚洲洋洋盆闭合，盆地初步定型，并进入后碰撞调整期，构造机制由挤压向伸展转化，引发广泛岩浆活动（何登发等，2018；石军等，2018）。第三阶段自二叠纪以来为陆内构造演化阶段，盆地进入充填与改造期。中二叠世起盆地由断陷转入拗陷，晚二叠世在强烈挤压背景下发生挠曲沉降，西北缘、南缘及东缘发育前陆冲断带和大规模推覆构造（Wang *et al.*, 2021；潘进等，2023；曹正林等，2024）。侏罗纪进入伸展—压扭构造体制，早期弱伸展背景下发育广阔浅水含煤沉积，中晚期东缘挤压活动增强，进一步塑造了复杂的隆坳相间格局及其沉积响应（张志杰等，2023）。

研究区阜康凹陷位于准噶尔盆地中央坳陷东部，邻近东部隆起，被白家海凸起、沙奇凸起和北

三台凸起等二级构造单元所环绕,南侧靠近博格达山(图 1-B),是接收准东地区北部与东北部隆起及南缘造山带物源输入、记录盆山耦合演化过程的重要沉积单元。

1.2 地层发育情况

准噶尔盆地东南缘石炭系广泛分布,以火成岩为主,常见凝灰岩、安山岩等,为 1 套海相火山岩和火山碎屑岩组合(王家林等, 2016)。区域上下二叠统发育下茆茆槽群石人沟组海相碎屑岩和塔什库拉组海相火山碎屑岩。阜康凹陷芦草沟组直接覆盖于石炭系之上,缺失下茆茆槽群沉积,两者呈区域性不整合接触。准噶尔盆地东南缘中二叠统区域上可划分为乌拉泊组(P_2w)、井井子沟组(P_2j)、芦草沟组(P_2l)和红雁池组(P_2h)(杨有星等, 2022)。但目前阜康凹陷中二叠统统一命名为芦草沟组,并未进一步细分地层,其与邻区平地泉组可进行横向对比。

芦草沟组(P_2l)是准噶尔盆地东南缘主要烃源岩层系,主要为砂岩、粉砂岩、白云岩、灰岩和油页岩的组合。在阜康凹陷内部,芦草沟组以泥岩为主,夹砂岩、粉砂岩;在靠近北三台凸起位置处,芦草沟组岩性呈现三段式特点,底部为 1 套厚层的砂岩、砂砾岩,夹泥岩粉砂岩,部分区域见红褐色砂砾岩、泥岩;中部以泥岩为主,夹薄层粉—细砂岩;顶部以泥岩为主,但是粉砂岩,细砂岩含量有所增加且泥岩与粉砂岩多为薄互层沉积,顶部偶见褐色砂砾岩和泥岩(图 1-C)。芦草沟组顶部上接上二叠统上乌尔禾组(P_3w),上乌尔禾组底部以砂砾岩、砂岩为主,部分区域砂砾岩呈紫红色或者黄绿色,中部主要为灰绿色泥岩夹砂岩和中薄层灰黑色泥岩;顶部为紫红色—灰绿色泥岩,常夹少量砂砾岩透镜体(图 1-C)。阜康凹陷三叠系序列完整,可系统划分为 5 个地层单元,分别为下三叠统韭菜园组(T_{1j})、烧房沟组(T_{1s})、克拉玛依组(T_{2-3k})、黄山街组(T_{3hs})和郝家沟组(T_{3hj})。

2 层序地层格架

前人研究将阜康凹陷中二叠统芦草沟组层序划分为 2 个半旋回,以最大湖泛面为界上升半旋回对应芦草沟组沉积早期,下降半旋回对应芦草沟组沉

积晚期(徐琦松, 2019)。综合前人的研究成果、阜康凹陷地震反射特征、岩性组合和测井曲线特征,认为芦草沟组为一个三级层序,可识别出初始湖泛面和最大湖泛面,从而将其划分为低位域、湖侵域和高位域。

2.1 地震层序特征

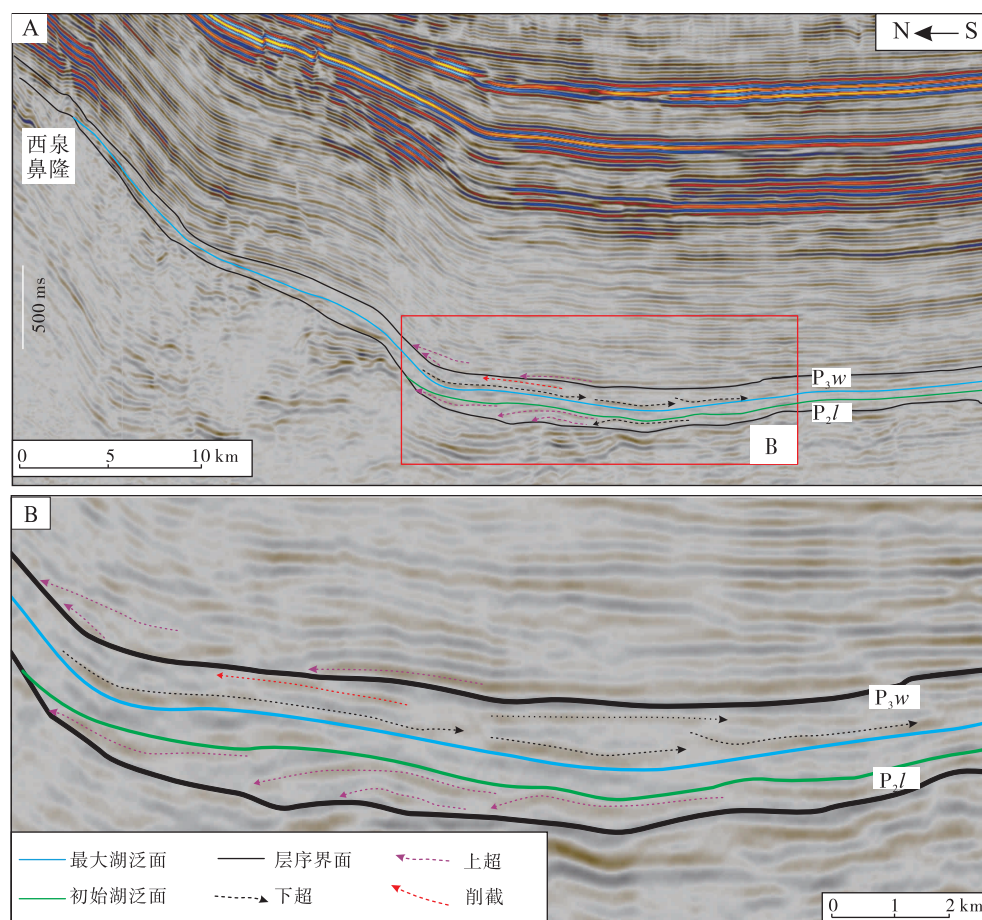
阜康凹陷中二叠统芦草沟下接石炭系火成岩,上覆上乌尔禾组碎屑岩,顶底皆为不整合接触关系。受地震资料精度以及芦草沟组深埋影响,芦草沟组在地震剖面上的显示较薄,最大湖泛面全区可追踪,但初始湖泛面仅在部分区域易于追踪识别。芦草沟组低位域以中—弱振幅双向下超和上超为特点,其分布范围局限于地貌坡折的坡脚位置(图 2-A, 2-B),在某些区域低位域可见前积反射,指示低湖平面和强物源供给影响下的碎屑沉积物向盆内推进(图 3-A, 3-B)。

湖侵域与低位域以初始湖泛面为界,湖侵域以弱振幅反射为主,靠近隆起区可见中弱振幅的前积反射(图 3-B),但需注意湖侵域前积反射向盆内推进距离不如低位域和高位域,表现为相对后撤的特征,指示强物源供给和湖平面上升过程中碎屑沉积物的有限推进(相对后退)(图 3-B)。高位域与湖侵域以最大湖泛面为界,界面之上可见连续的下超反射(图 2-B;图 3-B)。高位域顶界可见上超现象,表明另一个层序的开始。因此基于地震反射特征,芦草沟表现为 2 种三级层序结构:中低物源供给强度下低位域和湖侵域整体后退—高位域前进(图 2-B),及高物源供给强度下低位域前积—湖侵域前积但整体相对后撤—高位域前积的特征(图 3-B)。

2.2 钻测井层序特征

2.2.1 岩心和录井特征

在沉积学研究过程中,岩心资料是最直观和真实的资料,能够准确反映层序变化过程。阜康凹陷中二叠统芦草沟组与上二叠统上乌尔禾组之间为不整合接触,界面之下芦草沟组主体为暗色泥岩沉积,界面之上上乌尔禾组以厚层砂砾岩或砂岩为主(图 4-A, 4-B, 4-C)。这种突变的岩性接触关系通常指示构造抬升或者湖平面快速下降,导致更为粗粒的岩相与相对细粒的岩相直接垂向接触。上乌尔禾组底部这套砂砾岩在阜康凹陷及周缘地层广泛



A—芦草沟组层序和体系域地震界面特征；B—芦草沟组层序和体系域地震界面放大特征。P_{3w}—上乌尔禾组底界面；P_{2l}—芦草沟组底界面

图 2 阜康凹陷南北向地震剖面层序地层格架特征（位置见图 1-B）

Fig. 2 North-south oriented seismic section showing sequence stratigraphic framework of Fukang Sag (See Fig. 1-B for location)

发育且易于追踪，代表中二叠统芦草沟组与上二叠统上乌尔禾组之间的地层缺失及该层序界面的区域性。

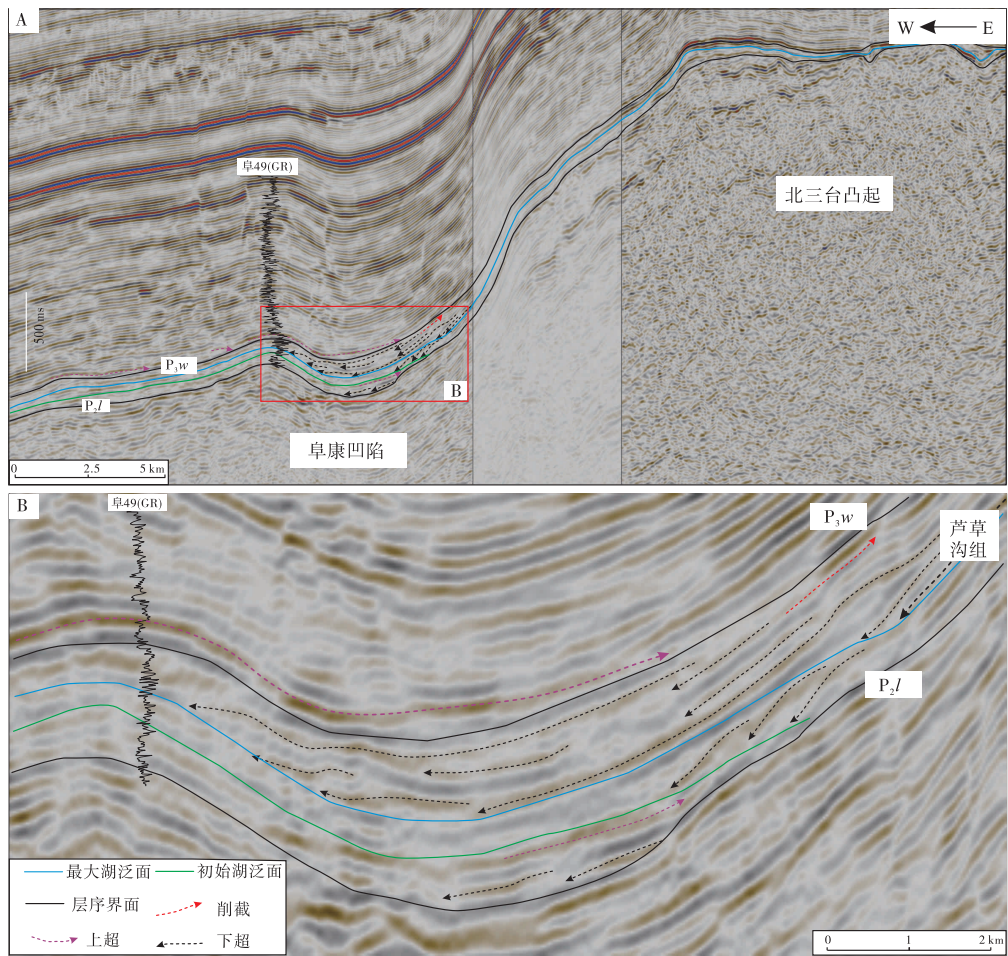
2.2.2 测井和录井层序特征

本次研究在常规测井曲线形态分析基础之上，引入频率趋势线（INPEFA 曲线）分析的方法综合分析三级层序格架内部的湖平面波动和砂泥配置演化规律。INPEFA 曲线以 GR 测井数据为输入，将隐含的层序与沉积旋回信息转换为趋势信号：从右向左的负向趋势指示基准面下降、水深变浅和砂岩含量增加，表现为反韵律，由负转正的拐点（正向拐点）常对应层序界面；从左向右的正向趋势指示基准面上升、水深变深与泥质含量增强，表现为正韵律，而由正转负的拐点（负向拐点）多对应洪泛面（薛欢欢等，2015；袁野等，2018）。

初始湖泛面（IFS）为湖平面初次快速上升的

界面，标志湖侵开始，是低位域与湖侵域的分界（图 5）。其下的低位域以砾岩、砂岩等粗粒沉积为主，GR 曲线多呈低值漏斗形或箱形，指示大量粗碎屑输入至盆地中心。初始湖泛面在测井上的典型响应为 GR 值首次快速增加，伴随岩性由砾/砂岩突变为暗色泥岩，INPEFA 曲线在低位域内表现为先降低后增加的趋势，并在初始湖泛面达到一个峰值（图 5），这是由于低位域早期湖平面快速下降和低位域晚期湖平面开始回升导致。初始湖泛面之上暗色泥岩显著增多，反映湖平面继续升高、水体加深，沉积物转入以细粒岩石为主（图 5）。

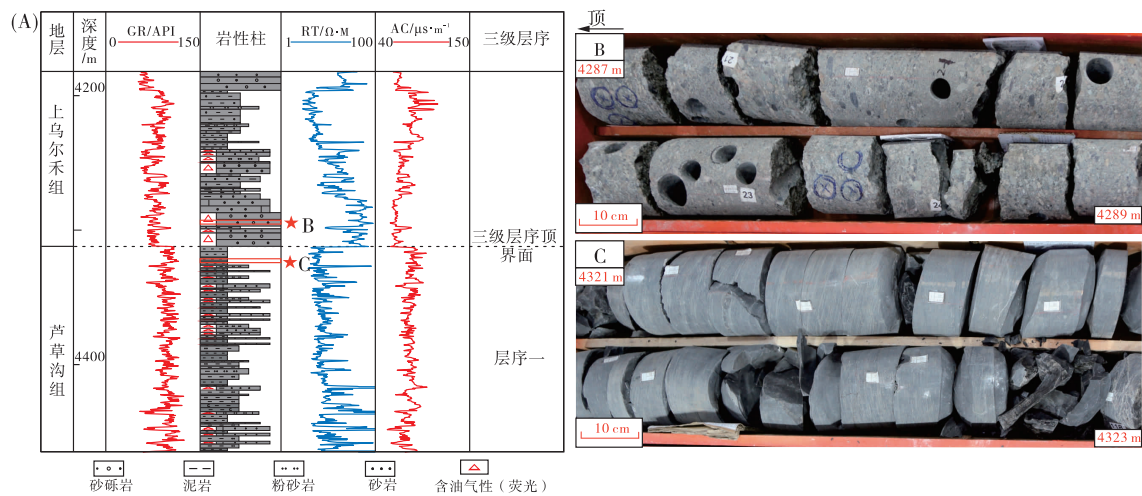
最大湖泛面（MFS）为湖平面达到最高点的位置，是湖侵域与高位域的分界，此时水深最大、沉积速率最低，测井上常表现为 GR 极大值，录井为厚层暗色泥岩。最大湖泛面之下的湖侵体系域整体以高 GR 的暗色泥岩为主，INPEFA 曲线缓慢正向



A—芦草沟组层序和体系域界面特征；B—芦草沟组层序和体系域界面放大特征。P_{3w}—上乌尔禾组底界面；P_{2l}—芦草沟组底界面

图 3 阜康凹陷东西向地震剖面层序地层格架特征（位置见图 1-B）

Fig. 3 West-east oriented seismic section showing sequence-stratigraphic framework of Fukang Sag (See Fig. 1-B for location)

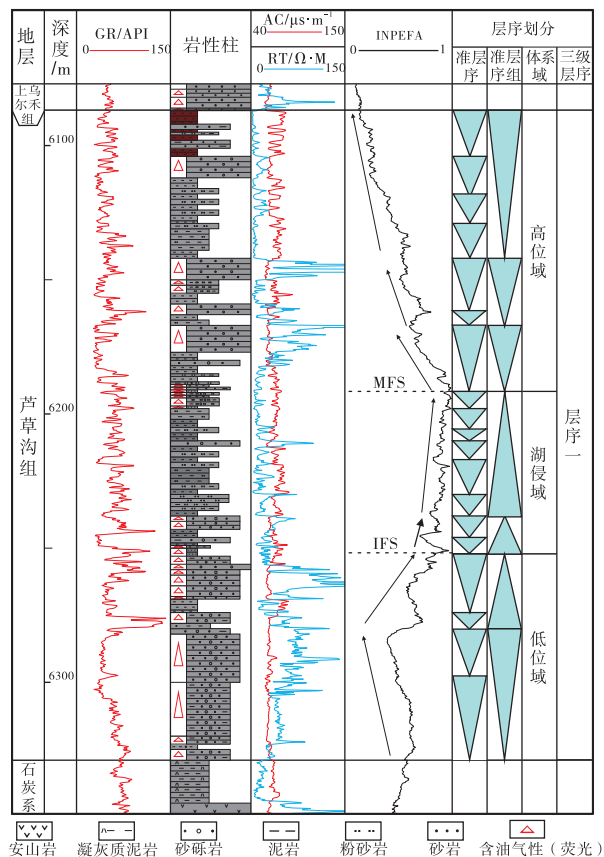


A—芦草沟组三级层序界面测录井特征，阜 50 井；B—上乌尔禾组底部灰色砂砾岩岩心，阜 50 井，井深 4287~4289 m；

C—芦草沟顶部暗色泥岩，阜 50 井，井深 4321~4323 m

图 4 阜康凹陷阜 50 井芦草沟组层序界面岩性特征

Fig. 4 Lithologic characteristics of sequence boundaries in the Lucaogou Formation of Well Fu50 in Fukang Sag



IFS—初始湖泛面；MFS—最大湖泛面

图 5 阜康凹陷芦草沟组测井层序划分方案（康探 5 井）

Fig. 5 Well-log and lithology based sequence stratigraphic subdivision of the Lucaogou Formation (Well Kangtan-5) in Fukang Sag

增长，并在最大湖泛面处达到峰值。最大湖泛面之上进入高位体系域，GR 值开始降低，整体向上呈反韵律（GR 值和 INPEFA 值逐步减小），同时伴随着岩石粒度逐渐增加，岩性开始出现砂岩、砂砾岩和代表氧化环境的红色泥岩，表明水体趋稳及变浅，甚至短暂暴露(图 6)。

基于以上的测井和录井岩性特征，阜康凹陷芦草沟组可识别出低位域、湖侵域和高位域，并组成一个完整的三级层序。本次研究基于经典层序地层学的划分方案，进一步可识别 7 个准层序组和 19 个准层序。其中低位域由 1 个的进积准层序组和退积准层序组构成，湖侵域由 2 个退积准层序组构成，高位域由 3 个进积准层序组构成，每个准层序组由若干个准层序构成。由于本次研究以体系域为单位分析古地貌和沉积相特征，故在此不对准层序组和准层序展开论述(图 5)。

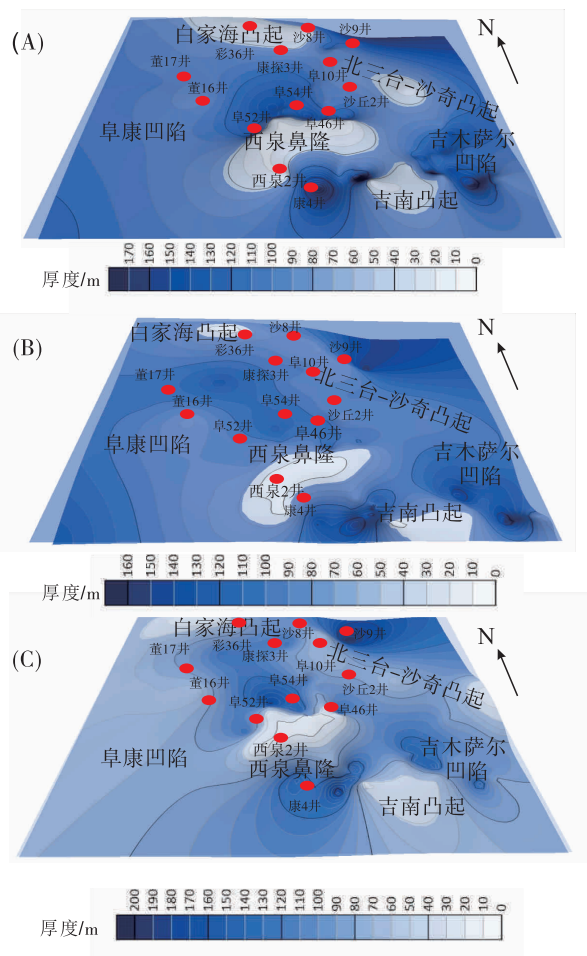


图 6 基于残余厚度的阜康凹陷及周缘古地貌图

Fig. 6 Palaeogeomorphic maps of Fukang Sag and adjacent areas based on residual thickness

2.3 古地貌特征

在芦草沟组层序格架精细研究的基础上，以体系域为单元统计地层厚度，并据此近似恢复阜康凹陷及其周缘在不同体系域阶段的古地貌格局(图 6)。结果显示，阜康凹陷整体表现为多隆—多坳的地貌格局，主要隆起包括：北部的白家海凸起、东北部的北三台—沙奇凸起、中南部的西泉鼻隆以及东南部的吉南凸起。徐琦松（2019）在钻井与地震资料基础上同样识别出阜康凹陷以东的西泉鼻隆物源区，但将北部—东北部解释为 1 条连续的中央隆起带，认为其将阜康凹陷与克拉美丽山分隔，并单独为阜康凹陷供源。与此不同，本研究认为北部白家海与东北部北三台—沙奇并非 1 条连续统一的隆起带，而是断续相连、其间为沟槽分隔的复合隆起体系(图 6)。这些隆起将准噶尔盆地东南

缘分隔为阜康凹陷与吉木萨尔凹陷等单元, 其中阜康凹陷受西泉鼻隆、北三台—沙奇凸起与白家海凸起的共同影响。

基于体系域为单元的地层厚度统计, 本研究进一步重建了低位域、湖侵域与高位域时期的古地貌演化: 低位域时期, 盆内隆起范围较大并临近阜康凹陷深洼区, 形成显著地形高差与陡坡(图 6-A); 进入湖侵域, 随着相对湖平面快速上升, 隆起区迅速萎缩并部分淹没于水下, 北三台—沙奇凸起一带由出露高地逐渐转化为水下低凸起, 白家海凸起的规模有所减少但仍然有局部高地出露水面, 西泉鼻隆仍持续出露为剥蚀区(图 6-B), 但隆起与深洼之间的地形高差减缓; 至高位域, 湖平面先缓慢上升后缓慢下降, 整体处于平稳状态, 西泉鼻隆范围有所收缩, 随着不断地填平补齐, 研究区内地形持续趋缓(图 6-C)。

3 物源特征分析

沉积物物源的恢复是源-汇系统中的重要一环, 对于古地理重建、储集砂体规模及储集层物性预测具有重要的参考意义(徐杰和姜在兴, 2019)。本次研究基于岩石薄片鉴定和重矿物数据恢复阜康凹陷芦草沟组的碎屑物质来源。

3.1 岩石学特征

碎屑岩的矿物组成是重要的物源指示。通过石英(Q)-长石(F)-岩屑(L)三角图(如 Dickinson 三角图), 可有效约束物源的构造背景与搬运距离(Dickinson and Suczek, 1979; Dickinson, 1985)。一般而言, 高石英含量多指向稳定克拉通或多期再循环, 易受风化磨蚀的长石和岩屑含量较少; 而长石和岩屑偏高则反映近源供给、风化弱以及火山弧/造山带背景。常用的成分成熟度指标 $Q/(F+L)$ 可用于示踪碎屑颗粒在风化—搬运—沉积过程后逼近稳定终极产物(以石英为主)的程度(Helmold, 1985)。

对砂岩样品的组分统计表明, 阜康凹陷芦草沟组砂岩以岩屑砂岩与长石岩屑砂岩为主, 少量岩屑长石砂岩(图 7-A)。砂岩样品整体石英含量低(平均 8.84%), 长石(20.71%)与岩屑(70.45%)偏高, 显示成分成熟度极低, 指示近源搬运特征。Dickinson 三角图投点主要落入未切割

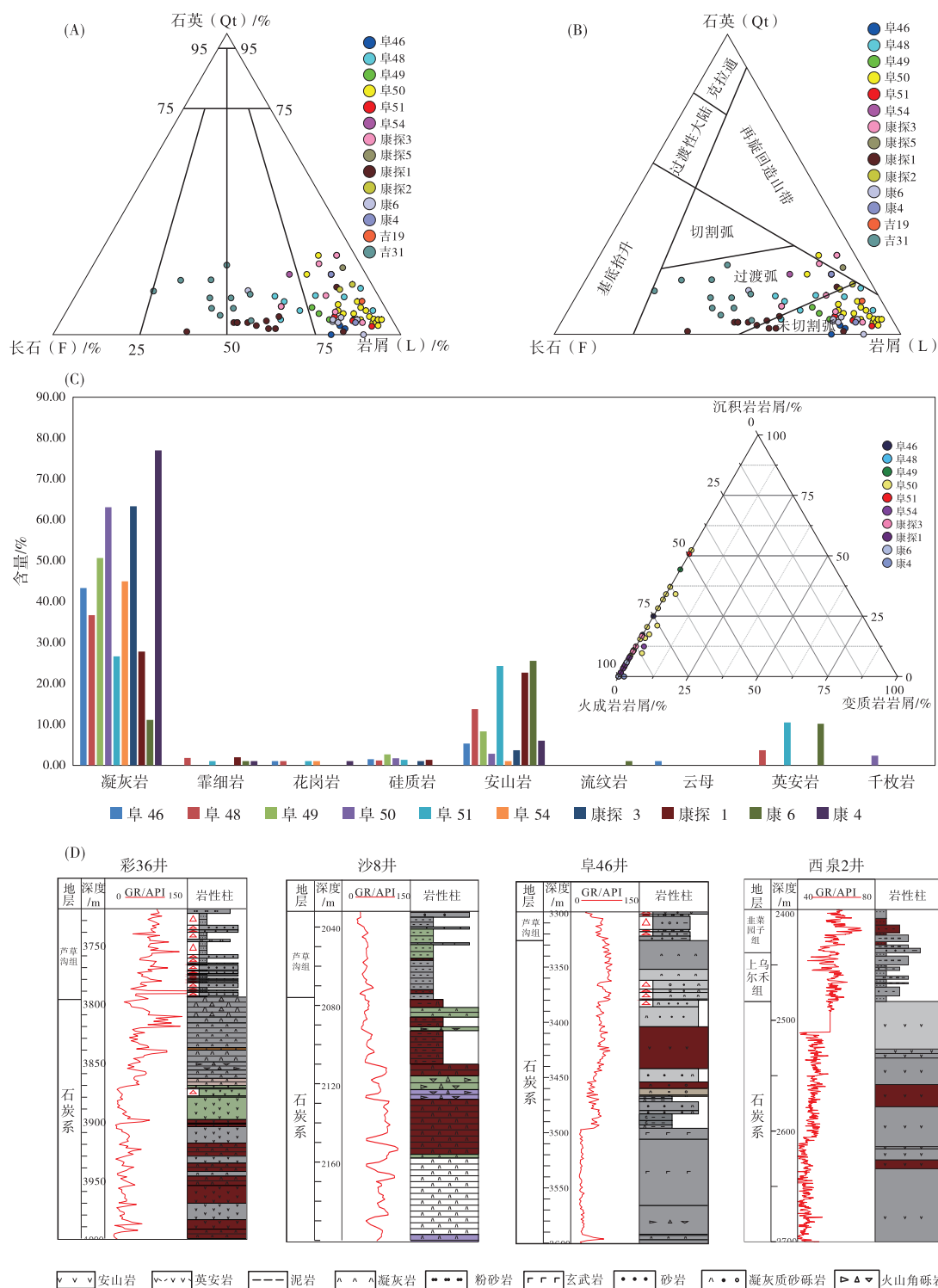
弧—过渡弧区域(图 7-B), 这与区域上准噶尔盆地东南缘在晚古生代早期(早—中石炭世)受古亚洲洋俯冲作用影响, 为活动大陆边缘/岛弧—弧后盆地体系相一致(Memtimin *et al.*, 2020)。岩屑类型以火山岩岩屑为主, 兼见少量沉积岩岩屑, 其中火山岩岩屑以凝灰岩和安山岩为主(图 7-C)。

薄片镜下观察发现砾岩、砂质砾岩和砂岩分选差、磨圆差, 以次棱状为主, 局部见次棱—圆状, 支持近源供给的认识。砾石成分以凝灰岩、安山岩、霏细岩、英安岩及部分方解石化碎屑为主。砂岩中岩屑以凝灰岩、安山岩、英安岩、霏细岩、硅质岩为主。胶结物总体较少, 主要为浊沸石、方解石、钠长石等, 杂基以泥质、绿泥石为主且含量不高(图 7-C)。结合阜康凹陷内侧隆起(如西泉鼻隆、北三台凸起)石炭系母岩以安山岩、凝灰岩、英安岩为主(图 7-C), 低石英、高岩屑(图 7-A), 推断临近隆起区很可能为主要沉积物供源区。

3.2 重矿物特征

重矿物分析是对沉积岩进行物源分析的常用方法, 主要通过重矿物组合对碎屑物质的母岩类型和物源方向进行判定(Helmold, 1985; 徐杰和姜在兴, 2019)。本次研究基于阜康凹陷 11 口井 14 个芦草沟组样品重矿物分析结果, 采用重矿物组成、主成分分析和聚类分析 3 个方法综合分析物源。样品主要位于阜康凹陷东部临近盆内凸起的阜东斜坡区。芦草沟组主要重矿物类型为锆石、磷灰石、白钛石、金红石、榍石、褐铁矿、石榴子石、电气石、角闪石、绿帘石、铬尖晶石、钛铁矿、磁铁矿(图 8)。

阜康凹陷主要重矿物类型为锆石、榍石、电气石、尖晶石等, 指示火成岩源区为研究区主要的碎屑物质来源。前人对中二叠统砂岩碎屑锆石 U-Pb 年代学分析中发现中二叠统砂岩样品主要的峰值集中在晚石炭世到早二叠世(~ 320 Ma, ~ 300 Ma, ~ 280 Ma), 与盆地内部北三台凸起、西泉鼻隆、沙奇凸起等隆起区的基底年龄相吻合(Zhao *et al.*, 2020)。芦草沟组重矿物的组合可大致分为 4 类并分布于 4 个不同的区域, 包含受白家海凸起影响的北部物源区, 受北三台和沙帐断褶带影响的东北部物源区, 受西泉鼻隆影响的中南部物源区(图 8)。



A—砂岩 Q-F-L 三角图；B—Dickinson 三角图；C—岩屑三角图及成分分布；D—阜康凹陷不同构造部位的石炭系基底岩性特征，井位请见图 6

图 7 阜康凹陷芦草沟组岩石组分组成及凹陷内部隆起区母岩类型

Fig. 7 Petrographic framework composition of the Lucaogou Formation in Fukang Sag and bedrock lithologies of intrabasin uplifts

此外康探 2 井为西泉鼻隆的南部，但与阜 54 和康探 1 井等重矿物组合特征更为相似，可能是因为西

泉鼻隆源区的母岩不均一性，导致其部分区域可能和北部物源有一定相似性(图 8)。

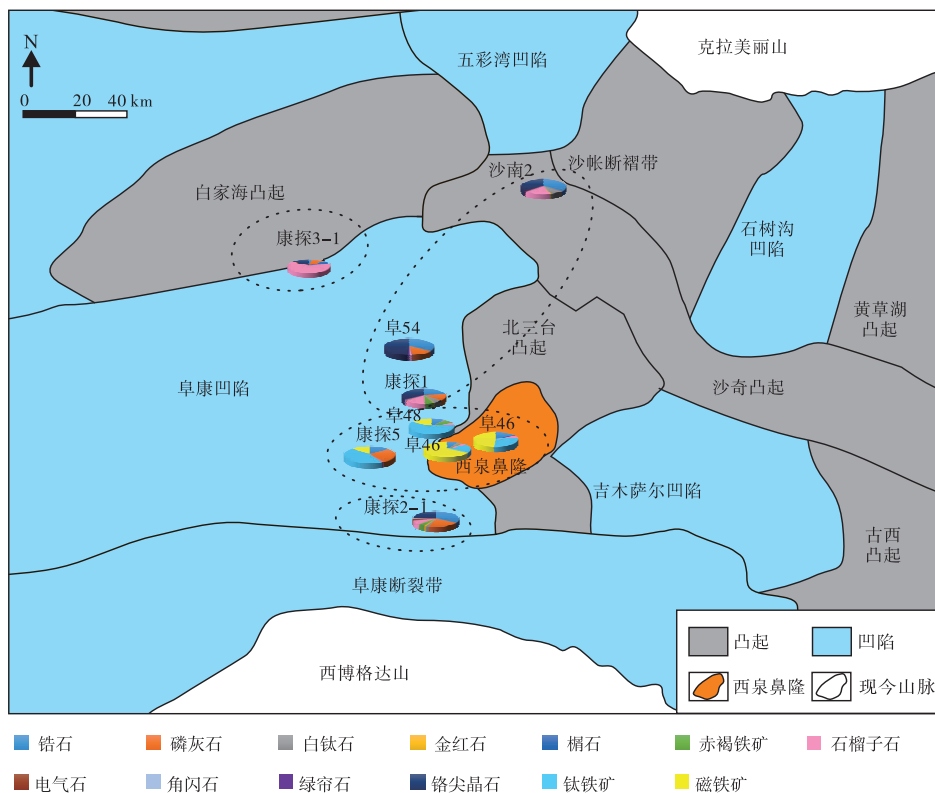


图 8 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组低位域砂岩重矿物含量分布

Fig. 8 Heavy mineral contents distribution of the Lucaogou Formation in Fukang Sag, Junggar Basin

聚类分析通过无监督方式将相似对象划分为若干组或子集,使同组成员在属性上更为接近(如在坐标空间中的距离更短),该方法已在重矿物研究中广泛应用(Weltje and von Eynatten, 2004; 何昕锴等, 2020; 许苗苗等, 2021)。本研究采用 Q 型聚类,以组内联接(平均联接)为算法、欧氏距离为度量对重矿物数据进行分类,结果见图 9-A:以距离阈值 20 为界,可将阜康凹陷芦草沟组样品分为 3 类(图 9-A)。第 1 类样品来自康探 1、康探 2、沙南 2、阜 54、阜 50 及康探 5-1 井,主要分布于沙奇凸起及沙奇凸起—西泉鼻隆一带,重矿物以铬尖晶石(0%~35.10%)、锆石(14.31%~50.32%)、磷灰石(0%~44.91%)为特征;第 2 类样品来自阜 46、阜 48 及康探 5 井,位于西泉鼻隆周缘,组合以钛铁矿(18.68%~61.32%)与磁铁矿(11.42%~66.63%)占优;第 3 类样品来自康探 3 井,位于阜康凹陷西北部,主要为石榴子石(65.60%)、铬尖晶石(13.04%)、磷灰石(9.45%)。在进一步收紧聚类阈值后,第 1 类内部可分出 2 支:康探 1、康探 2、沙南 2、阜 54-2 与阜 50 井相互更近;阜 54-2 与康探 5-1 井关系亦

更为接近;第 2 类中阜 48 与康探 5-2 井亲缘性更高。

主成分分析(PCA)可将多种重矿物的百分比变量降维为少数相互正交的主成分,比如主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2),2 条坐标轴(PC1 和 PC2)概括了主要重矿物组合变化的方向(曹立成等, 2013; Song *et al.*, 2024)。例如在图 9-B 中,样品在坐标轴上的位置越接近,其重矿物组合越相似,位于较远的区域则指向不同端元/物源。将各井位的重矿物饼图叠加到该坐标系后,可以直观看三端元格局:右上象限(北部物源)以康探 3-1 井为代表,富石榴子石与铬尖晶石;右下象限(东北部物源,沙南 2、康探 1-1、阜 54-2、康探 2-1、阜 50-1、康探 2-2、阜 54-1 等井)以锆石、铬尖晶石为主,并伴随磷灰石与石榴子石;左下象限(西泉鼻隆物源,阜 46-1、阜 46-2、阜 48-1、阜 48-2、康探 5-2 井)以磁铁矿、钛铁矿和锆石为特征。位于图中部偏下的康探 5-1 与阜 50-1 井落在两端元之间,显示受左下与右下 2 类物源共同控制的混合与过渡特征。

综合重矿物的组成、主成分分析(PCA)和 Q

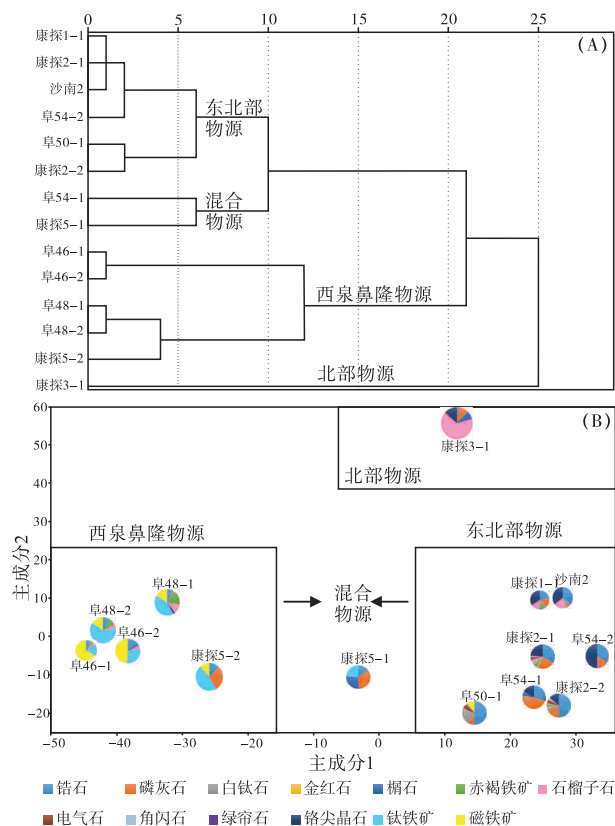


图 9 阜康凹陷芦草沟组重矿物聚类分析图 (A) 和主成分分析图 (B)

Fig. 9 Cluster analysis (A) and principal component analysis (B) of heavy mineral assemblages of the Lucaogou Formation in Fukang Sag

型聚类分析可见，阜康凹陷芦草沟组受多源供给影响，同一井位的不同样品亦表现来自不同物源区的组合差异。综合分析认为阜康凹陷芦草沟组沉积物以盆地内部构造高地供源为主，可识别三大物源区：(1) 北部物源区（白家海凸起）；(2) 中部—东北部隆起供源区（北三台凸起和沙奇凸起）；(3) 西泉鼻隆物源区。沉积物搬运方向上，北部物源自北向阜康凹陷中部供给（如康探 3 井）；中部—东北部隆起区向西南方向供源，影响范围可达西泉鼻隆周缘（如阜 54 井）；西泉鼻隆物源则向周边短距离供给（如阜 46 井、康探 5 井）。

4 沉积相类型及其分布

4.1 沉积相类型

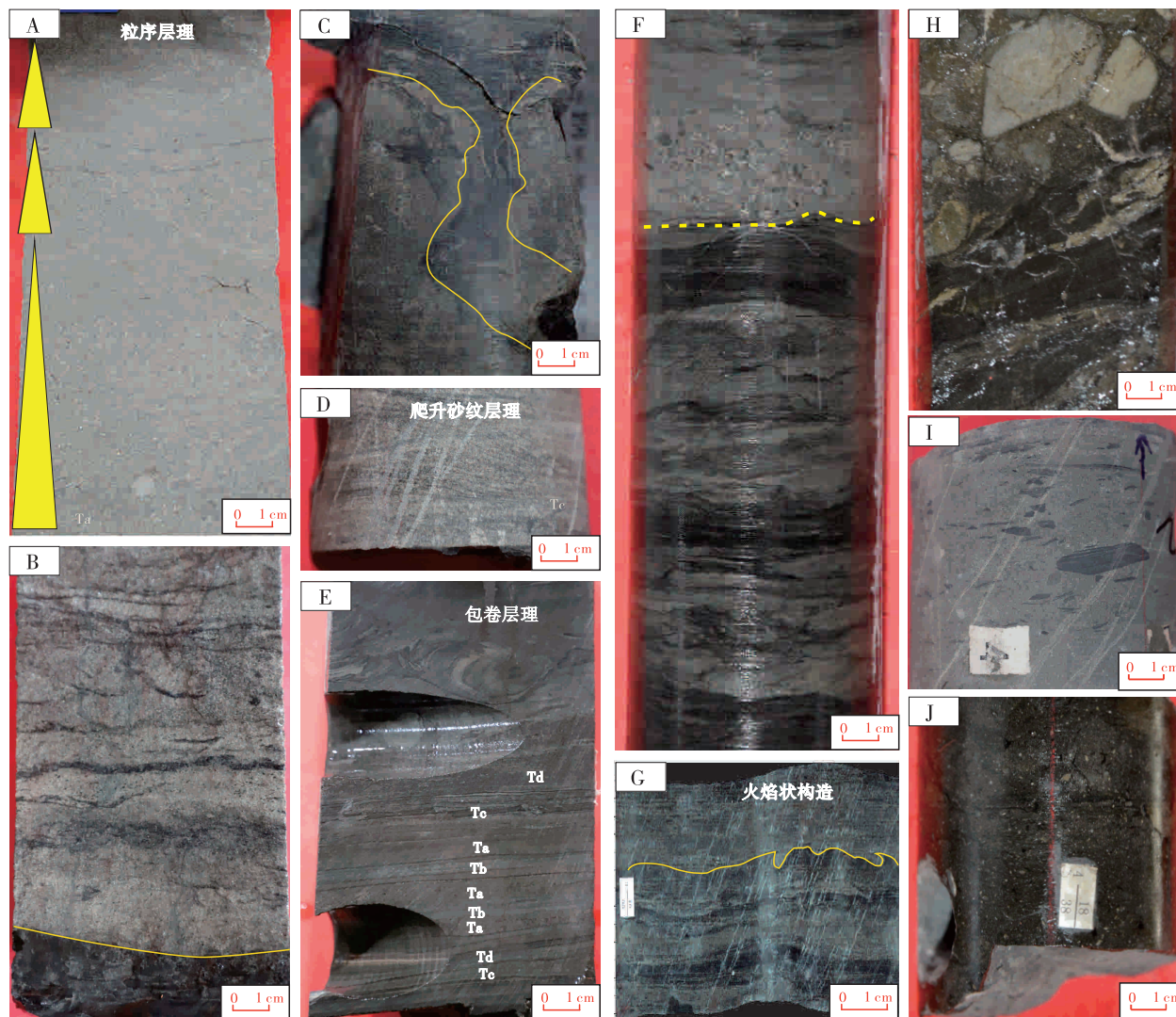
综合岩心、测井与地震资料，阜康凹陷芦草沟组可识别出 3 类主要沉积体系：湖底扇沉积、湖相

沉积和扇三角洲沉积。湖底扇通常归属于半深湖和深湖沉积的一部分，但由于湖底扇砂体是阜康凹陷芦草沟组重要储集砂体类型和勘探重点目标，因此单独作为一种相类型独立于湖相沉积。由于取心段多位于湖底扇发育层段，湖底扇的识别以岩心特征为主，并结合测井曲线形态和地震反射特征进行联合约束，其余相带则主要基于测井曲线与地震资料进行识别。

4.1.1 湖底扇沉积

阜康凹陷芦草沟组取心段多位于该层段底部低位域，岩心为砂岩、含砾砂岩与暗色泥岩互层，指示较深的水深环境。阜康凹陷芦草沟组在低位域发育浊积岩和砂质碎屑流沉积。芦草沟组砂岩段可见不完整的浊积岩鲍马序列 Ta 段正粒序块状砂岩（图 10-A），鲍马序列 Tc 段沙纹层理砂岩（图 10-D，10-F，10-G）、和鲍马序列 Td 段水平纹层泥岩段（图 10-F）。砂质碎屑流沉积是阜康凹陷芦草沟组另一重要的湖底扇重力流沉积类型。与具有鲍马序列、层理结构清晰的浊积岩不同，砂质碎屑流沉积是以砂为主、总体呈层流运移的高浓度重力流，其沉积物多表现为厚层块状砂岩，分选差，常见泥岩撕裂屑、泥岩团块与漂浮状砾石，基质或颗粒支撑，极少或缺乏平行和波状交错层理（李云等，2011；鲜本忠等，2013；Shanmugam, 2016）。阜康凹陷芦草沟组可见多种形式的碎屑流快速沉降堆积特点，例如块状含砾砂岩、泥质杂基支撑、砾石呈漂浮状（图 10-H），块状砂岩、砂质支撑、泥岩碎屑呈漂浮撕裂状（图 10-I），以及厚层块状砂岩中砂泥混杂快速堆积（图 10-J）。不同的碎屑流沉积代表了原始碎屑组分不同而在快速沉积卸载下形成不同的沉积构造现象，但都代表了高浓度的沉积物含量、未经充分的水动力分选、层流状况下快速堆积的结果。

阜康凹陷芦草沟组湖底扇沉积呈现为频繁的砂质碎屑流沉积、浊积岩或静水泥岩的频繁交替发育，代表了快速的流态转换和相变。此外由于湖底扇（主要为碎屑流）的快速卸载，其载荷容易引发软沉积变形，例如包卷层理、碟状液化构造等现象（图 10-C，10-E）。也可由地震、风暴等活动触发半固结地层中的孔隙水压力失衡，导致各类软沉积变形的发生（苏德辰和乔秀夫，2018），但是根据已有的钻井资料并未见到大规模的震积岩或风暴



A—浊积岩鲍马序列 Ta 段粒序层理砂岩, 康探 5 井, 井深 6650.3 m; B—块状砂岩见碟状构造, 康探 3 井, 井深 5830.2 m; C—滑塌变形泥岩, 康探 5 井, 井深 6249 m; D—浊积岩鲍马序列 Tc 段爬升砂纹层理砂岩, 康探 3 井, 井深 5334.5 m; E—鲍马序列粉砂岩向上过渡为包卷层理粉砂岩, 康探 2 井, 井深 4871.6 m; F—多期碎屑流被静水泥岩所分割, 康探 5 井, 井深 6192.55 m; G—火焰状构造泥质粉砂岩, 康探 2 井, 井深 4843.6 m; H—砂质碎屑流沉积, 见漂状砾石, 康探 5 井, 井深 6248 m; I—砂质碎屑流沉积, 见漂状泥砾, 康探 1 井, 井深 4999.33 m; J—块状砂岩, 内部砂泥混杂, 康探 5 井, 井深 6246.55 m

图 10 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组湖底扇岩心特征

Fig. 10 Core characteristics of sublacustrine fans in the Lucaogou Formation in Fukang Sag, Junggar Basin

扰动现象, 因此大规模的重力流沉积的快速卸载带来的异常载荷与孔隙水超压释放是引发这些软沉积变形的重要机制。

阜康凹陷浊积岩和砂质碎屑流沉积以薄层和频繁互层沉积为主, 难以用测录井资料进行更精细的微相区分, 因此基于测井和地震资料的沉积相解释过程中统一将这 2 类沉积归为湖底扇沉积。湖底扇沉积岩性以细砂岩为主, 但也可见含砾细砂, 砂岩顶底为暗色泥岩所包裹。湖底扇沉积的 GR 测井曲

线响应具有箱形和指形的特征(图 11)。地震剖面上湖底扇沉积表现为中弱振幅、连续差的双向下超的丘状凸起(图 12-A)。基于 2 口重点钻井的井震标定, 双向下超的丘形地震反射对应于较厚的湖底扇砂岩发育层段, GR 测井曲线上表现为低 GR 值、漏斗形和箱形特征(图 12-B, 12-C)。

4.1.2 湖相沉积

阜康凹陷深洼区-浅水区芦草沟组以湖相沉积为主, 依据水动力与水深差异, 可划分 2 类亚相

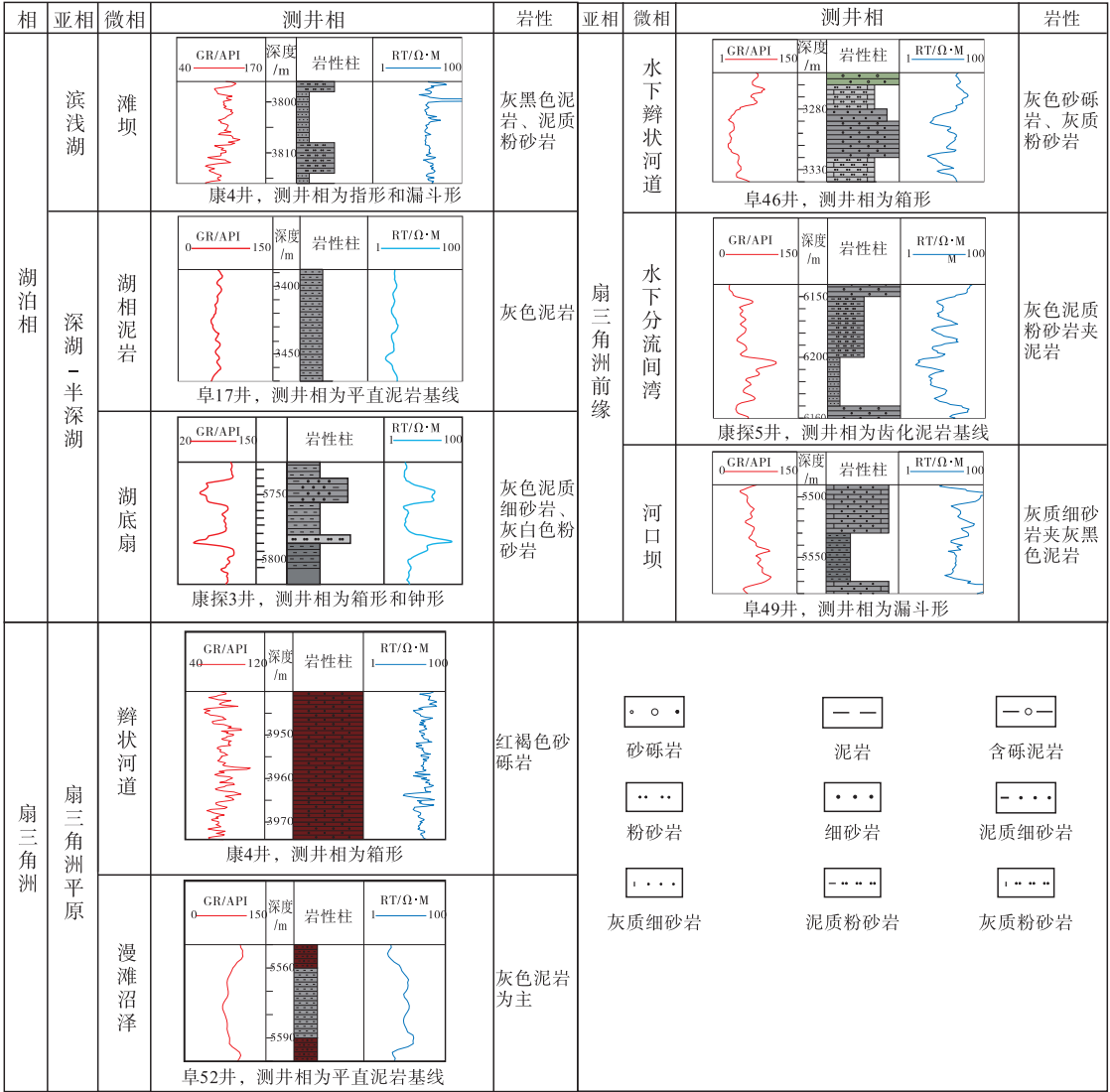


图 11 阜康凹陷芦草沟组沉积相测井特征

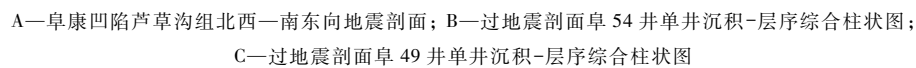
Fig. 11 Well-log characteristics of sedimentary facies in the Lucaogou Formation, Fukang Sag, Junggar Basin

(图 11)：(1) 浪基面之上的滨浅湖亚相，以灰色泥岩为主，夹少量灰绿色泥岩，指示整体还原和短暂暴露氧化的环境；水动力偏强，近岸高能带发育较粗碎屑，远岸低能区以细粒黏土为主，测井曲线表现为较为明显的齿化起伏；(2) 浪基面之下的半深湖—深湖亚相，为还原环境，岩性以灰黑色泥岩为主，夹薄层粉砂岩，曲线整体为低幅锯齿状、起伏较小而稳定。湖相沉积整体以细粒泥岩为主，但在高位域可见薄层粉细砂岩与泥岩互层的特征(图 11；图 12-B，12-C；图 13)，测井曲线呈指状特征，为滨浅湖—滩坝沉积。

4.1.3 扇三角洲沉积

阜康凹陷临近盆内隆起区以扇三角洲沉积为

主，可划分为扇三角洲平原与扇三角洲前缘 2 个亚相。近源的扇三角洲平原以 2 类微相为主：(1) 辫状河道微相，以粗粒碎屑沉积为主，录井可见红色砂砾岩，伽马测井曲线表现为低值箱状；(2) 泛滥平原—沼泽微相，其中沼泽以暗色泥岩为主而泛滥平原以红色泥岩为特征。扇三角洲前缘发育 3 类微相：(1) 水下辫状河道微相，岩性以含砾砂岩为主，测井曲线多见低幅钟形或齿化箱形；(2) 水下辫状河道间微相，以暗色泥岩夹薄层粉砂岩为主，GR 测井曲线表现为中高值、弱起伏的锯齿状；(3) 河口坝微相，以细砂岩为主，向上粒度变粗，GR 测井曲线常呈漏斗形(图 11；图 12-B，12-C)。



至西泉鼻隆东南缘(图 13)。从沉积相对比看, 芦草沟组在低位域—湖侵域阶段以半深湖—深湖环境为主, 广泛发育湖底扇沉积, 且剖面南段靠近西泉鼻隆处的湖底扇发育规模与频率明显高于北段。例

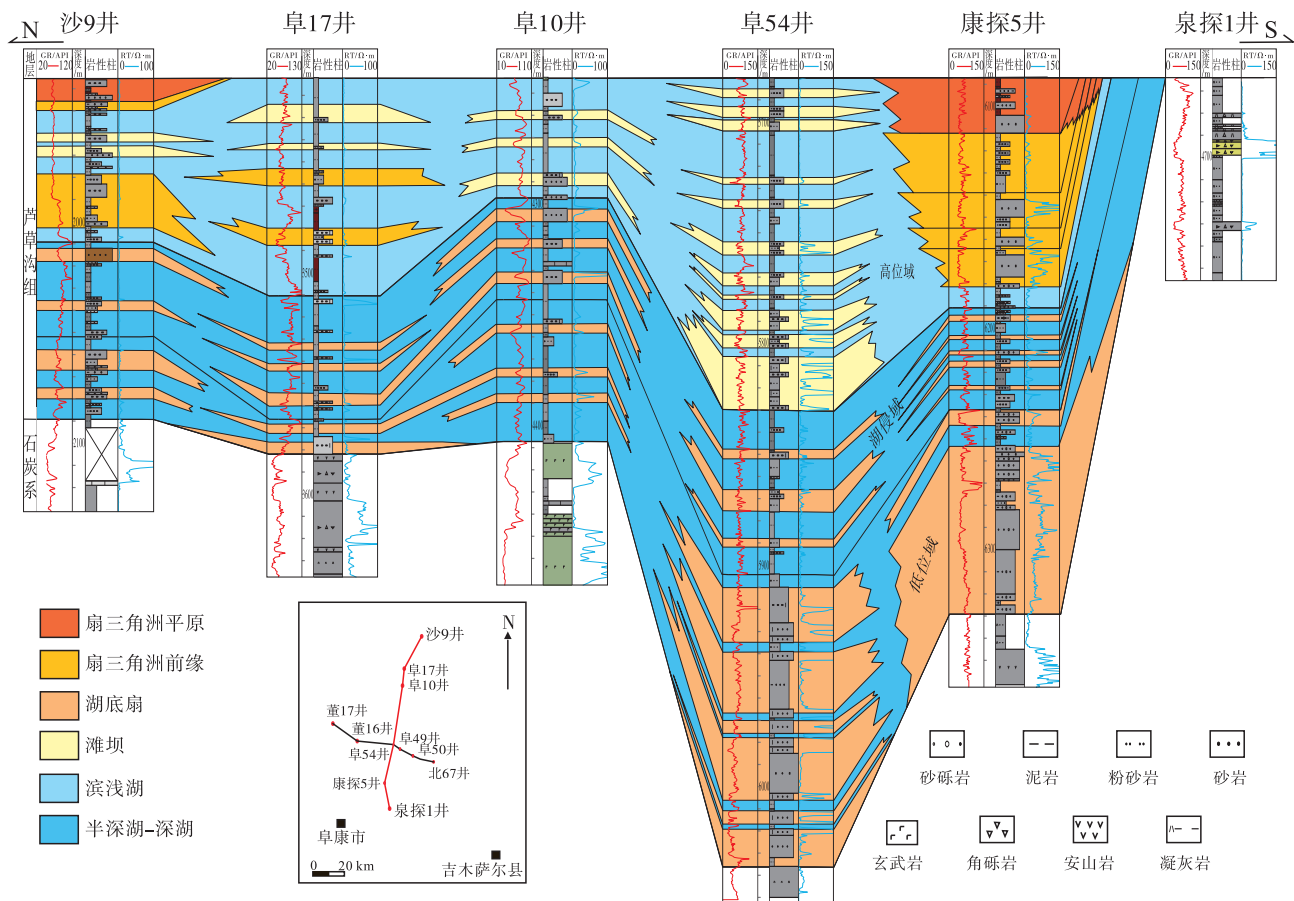


图 13 阜康凹陷芦草沟组南北向连井剖面相特征

Fig. 13 North-south oriented well-correlation facies profile of the Permian Lucaogou Formation in Fukang Sag

如阜 54 与康探 5 井位于紧邻西泉鼻隆的半深湖斜坡带，低位域时西泉鼻隆强烈侵蚀并向周缘湖盆供源，陆源物质供应量增大，促使深湖区形成厚度大、连续性强的湖底扇沉积。湖侵域整体以暗色泥岩和薄层的湖底扇沉积为主，砂体的发育规模和频次明显降低。高位域时期，伴随着整体湖平面回落，受北部白家海凸起和南部西泉鼻隆影响，北部（沙 9 井）与南部（康探 5 井）以扇三角洲相为主；中部低洼区（如阜 10 井、阜 54 井）高位早期仍见湖底扇沉积，高位晚期过渡为滨浅湖—滩坝沉积。南部泉探 1 井位于西泉鼻隆之上，未见芦草沟组沉积，该位置在芦草沟沉积时期为持续剥蚀区（图 13）。

东西向连井剖面自阜康凹陷延伸至北三台凸起（图 14），剖面中董 17、董 16 位于阜康凹陷内部，阜 54、阜 49、阜 50 井彼此相近位于西泉鼻隆北侧，而北 67 井位于北三台凸起中部东缘。连井沉积相对比显示，该剖面整体以半深湖—深湖环境为主，湖平面演化呈“先升后降”。在低位域阶段，西泉鼻

隆周缘湖底扇发育，而阜康凹陷西部距离源区较远导致（董 17、董 16 井）湖底扇规模较小；湖侵域阶段，湖平面抬升、西泉鼻隆供源减弱，其周缘湖底扇规模随之降低；高位域阶段随着水深回落和填平补齐效应，盆地逐步转入水体较浅的滨浅湖—滩坝沉积（图 14）。

4.3 平面沉积相分布

基于大量的钻井、测井和地震资料，本次研究重建了芦草沟不同时期的沉积相平面展布特征。芦草沟组沉积期内，阜康凹陷总体处于拗陷背景，区域隆起整体缓慢沉降并逐步萎缩，地貌起伏被削高填低而趋于平缓。湖平面与隆起规模共同控制了沉积体系的转换：在低位域，湖平面低、可容空间小但坡度大，隆起规模大且遭受强烈剥蚀，陡坡与充足物源使湖底扇频繁发育并向盆地深水区推进（图 15-A）。湖侵域时期，湖平面升高、可容空间增大，东北部北三台—沙奇凸起隆起被淹没为水下

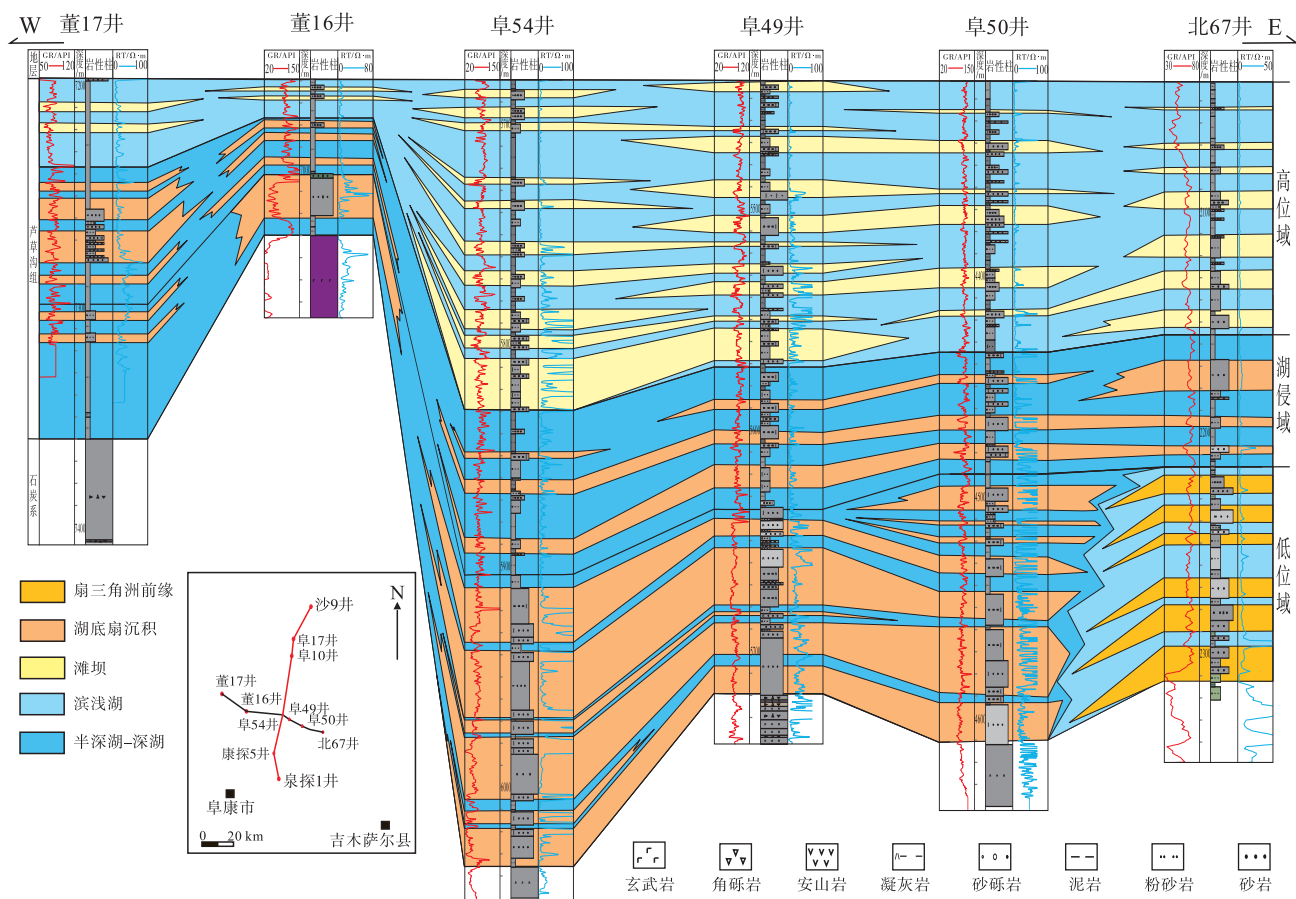


图 14 阜康凹陷芦草沟组东西向连井剖面相特征

Fig. 14 West-east oriented well-correlation facies profile of the Permian Lucaogou Formation in Fukang Sag

低凸起, 北部白家海凸起和南部西泉鼻隆剥蚀区范围缩小、供源能力减弱, 从而导致扇三角洲和湖底扇的规模减小, 盆地区以半深湖—深湖静水沉积为主, 仅在临近隆起区坡折一带发育局部湖底扇(图 15-B)。随后高位域时期湖平面趋稳回落, 经前期削高填低后的地形更为平缓, 盆地内部广泛发育滨浅湖—滩坝沉积(图 15-C)。物源分析表明阜康凹陷芦草沟组为近源沉积, 湖平面的升降控制了可容空间与坡折迁移, 隆起的规模控制了沉积物供源量, 三者叠加决定了湖底扇—扇三角洲—滩坝体系在时空上的组合与转换。

5 地貌—物源—湖平面演化控砂机制分析

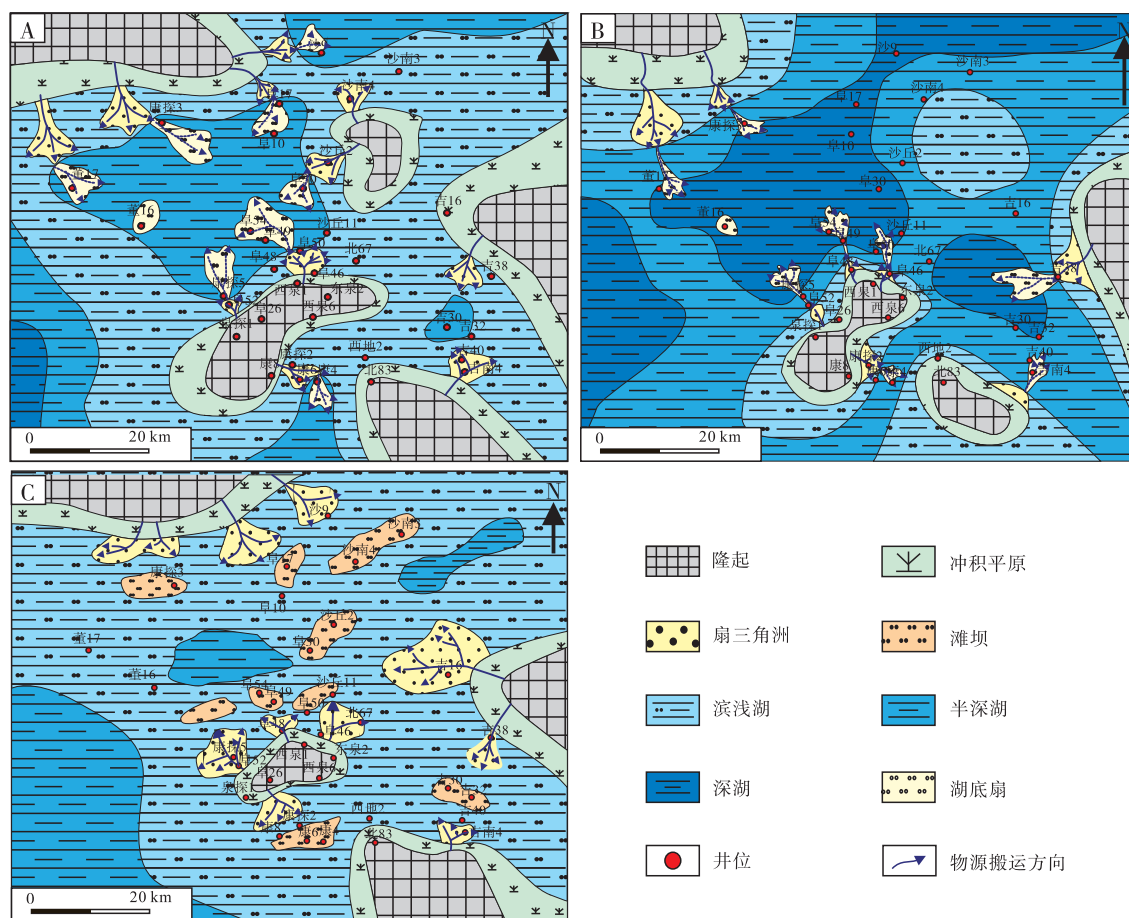
阜康凹陷芦草沟组沉积相带的展布受三大要素耦合控制: 古地貌格局、湖平面波动与物源供给。古地貌格局奠定可容纳空间与相带边界的基本格

架; 湖平面升降通过改变可容空间(A)与暴露/淹没范围(尤其是隆起区的出露范围)来动态调控沉积范围与过程; 物源条件则从母岩性质、搬运距离与供给量(S)等方面提供物质基础并决定沉积体规模与组成。三者共同作用于A/S值, 进而控制湖底扇—扇三角洲—滩坝等沉积体系的时空转换。

5.1 地貌对沉积的控制作用

结合芦草沟组层序、沉积演化和古地貌恢复(图 6; 图 15), 将地貌划分为以下 4 类:

1) 持续性隆起区: 以西泉鼻隆为代表, 芦草沟沉积时期以剥蚀为主、向周缘洼陷稳定供源。西泉鼻隆区域的钻井揭示石炭系基底直接与上二叠统上乌尔禾组、甚至与三叠系相接, 为持续的隆起剥蚀区。该地貌单元为长期、稳定的物源高地。因此西泉鼻隆在低位域和湖侵域持续为深洼区湖底扇提供物源(图 15-A, 15-B), 而高位域由于地形的趋



A—低位域沉积相分布；B—湖侵域沉积相分布；C—高位域沉积相分布

图 15 阜康凹陷芦草沟组沉积相分布

Fig. 15 Depositional facies distribution of the Lucaogou Formation in Fukang Sag

缓和水体变浅，西泉鼻隆周围以扇三角洲沉积为主，在盆内残留的深湖区仍能发育小规模的湖底扇沉积(图 15-C)。

2) 间歇性隆起区：主要为北三台—沙奇凸起，受湖平面波动影响表现为暴露和淹没的转换。低位域时期该地貌单元出露湖面并遭受剥蚀，可为盆地中央半深湖—深湖区湖底扇提供碎屑物质(图 15-A, 15-B)。湖侵和高位域时期湖平面较高，该地貌单元逐渐转向水下高地，逐渐成为滩坝砂体发育的优势位置(图 15-C)。

3) 斜坡区：位于湖盆坡折带，为陆—湖过渡地带。其演化与间歇性隆起相似，常缺失低位体系域或低位域不完整。在低位域晚期和湖侵域时期接受沉积，发育一定规模的湖底扇和湖相泥岩(图 15-A, 15-B)。在高位域时期随着湖平面的回落和地形的趋缓，斜坡带由于临近隆起区从而成为扇三

角洲平原和前缘的发育区(图 15-C)。

4) 深洼区：为湖盆主体，是长期可容纳空间中心。低位和湖侵域主要发育半深湖—深湖泥质沉积与湖底扇充填，但晚期随着湖平面的回落和稳定，深洼区逐渐从半深湖—深湖过渡为滨浅湖沉积，湖底扇规模逐渐萎缩甚至消失(图 15)。

5.2 湖平面变化对沉积的控制作用

阜康凹陷整体为隆坳相间古地理格局，湖平面波动对相带配置具有重要控制作用。低位域时期，湖平面低、地貌起伏大，隆起出露范围最大且供源强，近隆起浅水区广泛发育扇三角洲；陡坡带与充足物源共同触发湖底扇沉积，将粗粒碎屑搬运至深水区(图 6-A；图 15-A)。湖侵域时期，湖平面升高、可容空间增大，东北部隆起被淹没为水下低凸起，南部西泉鼻隆规模减小，供源能力随之减弱；盆地以半深湖—深湖静水沉积为主，湖底扇发育规

模与频率下降,仅在坡折下方受事件作用下局部发育(图 6-B;图 15-B)。高位域时期,阜康凹陷经历填平补齐作用后总体地形更趋平缓,残余隆起区周缘发育扇三角洲沉积,盆地内部普遍发育滨浅湖—滩坝沉积(图 6-C;图 15-C)。湖平面升降通过改变 A/S 与坡折位置,决定砂体的发育规模与沉积相带分布与迁移。

5.3 物源对沉积的控制作用

重矿物组合及定量分析、颗粒磨圆度以及 Q-F-L 成分等证据一致表明,芦草沟组为盆内隆起主导的近源供给体系。其中西泉鼻隆和白家海凸起为重要的盆内隆起,向周缘深洼区稳定供源(图 15)。北三台与沙帐断褶带可能构成东北向物源,但在芦草沟期整体表现为低隆:低位域时期暴露供源,湖侵域与高位域时期淹没并转为沉积区。

尽管中二叠世准噶尔盆地南北两侧的北天山和克拉美丽山已经隆起成为两大主要区域物源 (Zhao *et al.*, 2020), 并对准东地区沉积产生一定的影响。但是此时阜康凹陷南部博格达地区作为湖盆的中心,北天山物源难以越过博格达深槽到达阜康凹陷周边。另外从芦草沟组残余厚度图中可以发现(图 6),阜康凹陷的北部和东北部仍存在一系列凸起,湖平面较低时暴露于水面,湖平面较高时被淹没但仍然可以作为一个水下低凸起,阻挡更北部克拉美丽山的物源输入。需要指出的是,这些盆内隆起并非连续统一的高地,不排除其间发育沟槽,使北部物源局部越过这些低凸起进入阜康凹陷。但就本次研究而言,盆内隆起体系仍是控制芦草沟组沉积体系格局与砂体展布的重要因素。

6 结论

本研究以准噶尔盆地中二叠统芦草沟组为研究对象,综合岩心、测录井、地震、岩石薄片和重矿物等资料,开展系统的层序地层格架、古物源、古地貌和沉积相分析,取得以下主要认识:

1) 阜康凹陷芦草沟组为一个三级层序,其内部可进一步划分出低位体系域、湖侵体系域与高位体系域。层序格架控制了储集砂体的垂向演化规律。

2) 古地貌重建表明阜康凹陷及周缘存在多个盆内凸起区,隆坳相间的地貌格局阻隔区域物源大

规模进入阜康凹陷。古物源研究进一步表明阜康凹陷芦草沟组储集砂体以盆内隆起近源供给为主,包括西泉鼻隆、东北部北三台—沙奇凸起与北部白家海凸起。

3) 阜康凹陷芦草沟组发育扇三角洲、湖泊和湖底扇沉积。湖底扇沉积以浊积岩与砂质碎屑流沉积为主,主要位于西泉鼻隆和北三台凸起向盆地一侧的陡坡坡折之下。湖相沉积广泛发育,而扇三角洲沉积主要沿构造—地貌隆起边缘分布。

4) 古地貌—物源—湖平面波动共同控制了沉积相带、储集砂体的发育规模、平面展布及纵向叠置样式。湖平面低位时期,盆内隆起区暴露面积大、剥蚀作用强,提供近源碎屑,形成大规模湖底扇沉积。湖平面快速上升时期,盆内隆起区范围快速缩减,部分隆起区成为水下低凸起,此时盆地内部湖底扇沉积规模受限,而以半深湖—深湖泥质沉积为主。湖平面高位时期,伴随湖平面的稳定和地形的逐渐趋缓,盆内残留隆起区周缘形成扇三角洲沉积体系,水下低凸起成为滩坝砂体堆积的有利场所,盆地深洼区逐渐从半深湖过渡为滨浅湖沉积。

参考文献 (References)

- 曹立成,姜涛,王振峰,张道军,孙辉. 2013. 琼东南盆地新近系重矿物分布特征及其物源指示意义. 中南大学学报(自然科学版), 44(5): 1971-1981. [Cao L C, Jiang T, Wang Z F, Zhang D J, Sun H. 2013. Characteristics of heavy minerals and their implications for Neogene provenances evolution in Qiongdongnan Basin. Journal of Central South University (Science and Technology), 44(5): 1971-1981]
- 操应长,徐琦松,王健. 2018. 沉积盆地“源-汇”系统研究进展. 地学前缘, 25(4): 116-131. [Cao Y C, Xu Q S, Wang J. 2018. Progress in “source-to-sink” system research. Earth Science Frontiers, 25(4): 116-131]
- 曹正林,周川闽,龚德瑜,王瑞菊,丁立华,杨春,张志杰. 2024. 准噶尔盆地中一下二叠统构造—岩相古地理特征与烃源岩分布. 石油学报, 45(9): 1349-1371. [Cao Z L, Zhou C M, Gong D Y, Wang R J, Ding L H, Yang C, Zhang Z J. 2024. Tectono-lithofacies paleogeographic characteristics and source rock distribution of the Middle-Lower Permian in Junggar Basin. Acta Petrolei Sinica, 45(9): 1349-1371]
- 陈正乐,鲁克改,王果,陈柏林,王国荣,郑恩玖,崔玲玲,丁文君. 2010. 准噶尔盆地南缘新生代构造特征及其与砂岩型铀矿成矿作用初析. 岩石学报, 26(2): 457-470. [Chen Z L, Lu K G, Wang G, Chen B L, Wang G R, Zheng E J, Cui L L, Ding W J. 2010. Characteristics of Cenozoic structural movements in southern margin of Junggar basin and its relationship to the mineralization of sand-

- stone-type uranium deposits. *Acta Petrologica Sinica*, 26 (2): 457-470]
- 杜晓峰, 庞小军, 王清斌, 宋章强, 马正武. 2017. 石白坨凸起东段围区沙一二段古物源恢复及其对储层的控制. *地球科学*, 42(11): 1897-1909. [Du X F, Pang X J, Wang Q B, Song Z Q, Ma Z W. 2017. Restoration of the paleo-provenance of the Es₁₂ in the eastern of Shijiutuo uplift and its control on reservoir. *Earth Science*, 42(11): 1897-1909]
- 何登发, 张磊, 吴松涛, 李涤, 甄宇. 2018. 准噶尔盆地构造演化阶段及其特征. *石油与天然气地质*, 39(5): 845-861. [He D F, Zhang L, Wu S T, Li D, Zhen Y. 2018. Tectonic evolution stages and features of the Junggar Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(5): 845-861]
- 何昕锴, 李晓龙, 赵洪, 阮威涵, 许长海. 2020. 东海西湖凹陷碎屑岩物源聚类分析. *海洋地质前沿*, 36(6): 11-19. [He X K, Li X L, Zhao H, Ruan W H, Xu C H. 2020. Clustering analysis of clastic rocks for provenance in Xihu depression. *Marine Geology Frontiers*, 36(6): 11-19]
- 姜在兴. 2010. 沉积体系及层序地层学研究现状及发展趋势. *石油与天然气地质*, 31(5): 535-541. [Jiang Z X. 2010. Studies of depositional systems and sequence stratigraphy: the present and the future. *Oil & Gas Geology*, 31(5): 535-541]
- 李涤. 2016. 准噶尔盆地及邻区石炭纪构造格架与沉积充填演化. 中国地质大学(北京)博士学位论文. [Li D. 2016. Carboniferous tectonic framework and sedimentary filling evolution in the Junggar Basin and adjacent area, NW China. Doctoral dissertation of China University of Geosciences(Beijing)]
- 李涛, 张进, 卢苗安. 2008. 准噶尔盆地南缘东段、东北缘盆地耦合研究. *新疆石油地质*, 29(6): 680-686. [Li T, Zhang J, Lu M A. 2008. Study on basin-mountain coupling in east segment of southern margin and northeastern margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 29(6): 680-686]
- 李玮, 胡健民, 黎敦朋, 刘金侠, 孙宜朴, 梁积伟. 2007. 新疆博格达山北缘晚古生代—中生代古水流样式转折及其构造意义. *沉积学报*, 25(2): 283-292. [Li W, Hu J M, Li D P, Liu J X, Sun Y P, Liang J W. 2007. Analysis of the Late Paleozoic and Mesozoic paleocurrents and its constructional significance of the northern Bogdashan, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 25(2): 283-292]
- 李云, 郑荣才, 朱国金, 胡晓庆. 2011. 沉积物重力流研究进展综述. *地球科学进展*, 26(2): 157-165. [Li Y, Zheng R C, Zhu G J, Hu X Q. 2011. Reviews on sediment gravity flow. *Advances in Earth Science*, 26(2): 157-165]
- 林畅松, 夏庆龙, 施和生, 周心怀. 2015. 地貌演化、源—汇过程与盆地分析. *地学前缘*, 22(1): 9-20. [Lin C S, Xia Q L, Shi H S, Zhou X H. 2015. Geomorphological evolution, source to sink system and basin analysis. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 9-20]
- 刘强虎, 李志奎, 陈贺贺, 周子强, 谈明轩, 朱筱敏. 2023. 陆相裂陷盆地深时源—汇系统关键地质问题及革新方向. *地球科学*, 48(12): 4586-4612. [Liu Q H, Li Z Y, Chen H H, Zhou Z Q, Tan M X, Zhu X M. 2023. Key geological issues and innovation directions in deep-time source-to-sink system of continental rift basins. *Earth Science*, 48(12): 4586-4612]
- 潘进, 刘新龙, 李辉, 刘超威, 李树博, 陈洪, 王泽胜, 李宗浩, 金腾瑞, 陈美玲, 朱新亭, 樊向东. 2023. 阜东斜坡芦草沟组岩相组合特征及展布规律. *沉积学报*, 41(5): 1366-1379. [Pan J, Liu X L, Li H, Liu C W, Li S B, Chen H, Wang Z S, Li Z H, Jin T R, Chen M L, Zhu X T, Fan X D. 2023. Characteristics and distribution of lithofacies assemblages of the Permian Lucaogou Formation in the eastern slope of Fukang Sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(5): 1366-1379]
- 邵龙义, 王学天, 李雅楠, 刘炳强. 2019. 深时源—汇系统古地理重建方法评述. *古地理学报*, 21(1): 67-81. [Shao L Y, Wang X T, Li Y N, Liu B Q. 2019. Review on palaeogeographic reconstruction of deep-time source-to-sink systems. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(1): 67-81]
- 石军, 邹艳荣, 余江, 刘家靖. 2018. 准噶尔盆地阜康凹陷芦草沟组高有机碳页岩发育的古环境. *天然气地球科学*, 29(8): 1138-1150. [Shi J, Zou Y R, Yu J, Liu J J. 2018. Paleoenvironment of organic-rich shale from the Lucaogou Formation in the Fukang Sag, Junggar Basin, China. *Natural Gas Geoscience*, 29(8): 1138-1150]
- 史燕青. 2020. 准噶尔盆地东南缘中二叠世—早三叠世构造—古地理演化研究. 中国石油大学(北京)博士学位论文. [Shi Y Q. 2020. Tectono-paleogeographic evolution during the Middle Permian-Early Triassic in the southeastern margin of the Junggar Basin. Doctoral dissertation of China University of Petroleum(Beijing)]
- 苏德辰, 乔秀夫. 2018. 黏性沉积物中的古地震触变流动变形. *古地理学报*, 20(4): 609-622. [Su D C, Qiao X F. 2018. Thixotropic deformation features of cohesive sediments triggered by palaeoearthquakes. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(4): 609-622]
- 王家林, 吴朝东, 朱文, 李壮, 吴峻, 陈榕, 王军. 2016. 准噶尔盆地南缘二叠纪—三叠纪构造—沉积环境与原型盆地演化. *古地理学报*, 18(4): 643-660. [Wang J L, Wu C D, Zhu W, Li Z, Wu J, Chen R, Wang J. 2016. Tectonic-depositional environment and prototype basin evolution of the Permian-Triassic in southern Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 18(4): 643-660]
- 王新桐. 2017. 博格达山周缘二叠系—侏罗系地层格架及沉积演化. 中国石油大学(华东)硕士学位论文. [Wang X T. 2017. Stratigraphic framework and sedimentary evolution of the Permian-Jurassic strata in the surrounding area of the Bogda Mountains. Masteral dissertation of China University of Petroleum(East China)]
- 王元龙, 成守德. 2001. 新疆地壳演化与成矿. *地质科学*, 36(2): 129-143. [Wang Y L, Cheng S D. 2001. Crust evolution and mineralization of Xinjiang Uygur Autonomous Region. *Scientia Geologica Sinica*, 36(2): 129-143]
- 武向峰. 2020. 博格达山地区二叠系沉积体系及其对构造的响应. 中国海洋大学(武汉)博士学位论文. [Wu X F. 2020. Sedimentary system and its response to structure of the Permian in the Bogda

- Mountain area. Doctoral dissertation of Ocean University of China]
- 鲜本忠, 万锦峰, 董艳蕾, 马乾, 张建国. 2013. 湖相深水块状砂岩特征、成因及发育模式: 以南堡凹陷东营组为例. 岩石学报, 29(9): 3287–3299. [Xian B Z, Wan J F, Dong Y L, Ma Q, Zhang J G. 2013. Sedimentary characteristics, origin and model of lacustrine deep-water massive sandstone: an example from Dongying Formation in Nanpu depression. *Acta Petrologica Sinica*, 29(9): 3287–3299]
- 徐杰, 姜在兴. 2019. 碎屑岩物源研究进展与展望. 古地理学报, 21(3): 379–396. [Xu J, Jiang Z X. 2019. Provenance analysis of clastic rocks: current research status and prospect. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 21(3): 379–396]
- 许苗苗, 魏晓榕, 杨蓉, 王平, 程晓敢. 2021. 重矿物分析物源示踪方法研究进展. 地球科学进展, 36(2): 154–171. [Xu M M, Wei X C, Yang R, Wang P, Cheng X G. 2021. Research progress of provenance tracing method for heavy mineral analysis. *Advances in Earth Science*, 36(2): 154–171]
- 徐琦松. 2019. 阜康凹陷东部二叠系“源-汇”系统与沉积充填过程. 中国石油大学(华东)博士学位论文. [Xu Q S. 2019. The “source-to-sink” system and sedimentary filling process during the Permian in the eastern Fukang sag. Doctoral dissertation of China University of Petroleum (East China)]
- 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 赵梦. 2017. 沉积盆地“源-汇”系统研究新进展. 石油与天然气地质, 38(1): 1–11. [Xu C G, Du X F, Xu W, Zhao M. 2017. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin. *Oil & Gas Geology*, 38(1): 1–11]
- 薛欢欢, 李景哲, 李恕军, 王梦琪, 孙中强, 于涛. 2015. INPEFA 在高分辨率层序地层研究中的应用: 以鄂尔多斯盆地油房庄地区长 4+5 油组为例. 中国海洋大学学报(自然科学版), 45(7): 101–106. [Xue H H, Li J Z, Li S J, Wang M Q, Sun Z Q, Yu T. 2015. Application of INPEFA technique to research high resolution sequence stratigraphy: as an example of Youfangzhuang area Chang 4+5 in Ordos Basin. *Periodical of Ocean University of China*, 45(7): 101–106]
- 杨有星, 张君峰, 张金虎, 高永进, 周新桂, 孙相灿, 文磊, 苗苗青. 2022. 新疆博格达山周缘中上二叠统与中上三叠统沉积特征及其主控因素. 石油勘探与开发, 49(4): 670–682. [Yang Y X, Zhang J F, Zhang J H, Gao Y J, Zhou X G, Sun X C, Wen L, Miao M Q. 2022. Sedimentary characteristics and main controlling factors of the Middle–Upper Permian and Middle–Upper Triassic around Bogda Mountain of Xinjiang, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 49(4): 670–682]
- 袁野, 王黎, 谢锐杰. 2018. INPEFA 技术在层序地层划分中的应用: 以苏北盆地溱潼凹陷南华区块阜三段为例. 石油实验地质, 40(6): 871–876. [Yuan Y, Wang L, Xie R J. 2018. Application of INPEFA technology to sequence stratigraphy of the third member of Funing Formation, Nanhua block, Qintong Sag, North Jiangsu Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 40(6): 871–876]
- 张逊. 2020. 准噶尔盆地东南缘中-上二叠统沉积体系类型及芦草沟组页岩相学研究. 中国地质大学(武汉)博士论文: 1–144. [Zhang X. 2020. Research on the sedimentary system types of the Middle and Upper Permian in the southeastern margin of the Junggar Basin and the petrofacies of the Lucaogou Formation shale. Doctoral dissertation of China University of Geosciences (Wuhan): 1–144]
- 张志杰, 周川闽, 袁选俊, 曹正林, 陈星渝, 万力, 成大伟. 2023. 准噶尔盆地二叠系源-汇系统与古地理重建. 地质学报, 97(9): 3006–3023. [Zhang Z J, Zhou C M, Yuan X J, Cao Z L, Chen X Y, Wan L, Cheng D W. 2023. Source-to-sink system and palaeogeographic reconstruction of Permian in the Junggar basin, northwestern China. *Acta Geologica Sinica*, 97(9): 3006–3023]
- 朱红涛, 徐长贵, 朱筱敏, 曾洪流, 姜在兴, 刘可禹. 2017. 陆相盆地源-汇系统要素耦合研究进展. 地球科学, 42(11): 1851–1870. [Zhu H T, Xu C G, Zhu X M, Zeng H L, Jiang Z X, Liu K Y. 2017. Advances of the source-to-sink units and coupling model research in continental basin. *Earth Science*, 42(11): 1851–1870]
- 朱筱敏, 王华, 朱红涛, 邵龙义, 纪友亮. 2023. 陆相层序地层学研究进展及发展关注. 石油学报, 44(8): 1382–1398. [Zhu X M, Wang H, Zhu H T, Shao L Y, Ji Y L. 2023. Research progress and development focuses of continental sequence stratigraphy. *Acta Petrologica Sinica*, 44(8): 1382–1398]
- Allen P A. 2008. From landscapes into geological history. *Nature*, 451(7176): 274–276.
- Dickinson W R, Suczek C A. 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. *AAPG Bulletin*, 63(12): 2164–2182.
- Dickinson W R. 1985. Interpreting provenance relations from detrital modes of sandstones. In: Zuffa G G (ed). *Provenance of Arenites*. Boston: D. Reidel Publishing Company, 333–361.
- Helland-Hansen W, Sømme T O, Martinsen O J, Lunt I, Thurmond J. 2016. Deciphering earth's natural hourglasses: perspectives on source-to-sink analysis. *Journal of Sedimentary Research*, 86(9): 1008–1033.
- Helmold K P. 1985. Provenance of feldspathic sandstones: the effect of diagenesis on provenance interpretations: a review. In: *Provenance of Arenites*. Dordrecht: Springer Netherlands, 139–163.
- Mentimin M, Pe-Piper G, Piper D J W, Guo Z J, Zhang Y Y. 2020. Carboniferous arc-related volcanism in SW Bogda Mountain, Northwest China, and its implications for regional tectonics. *Lithos*, 360–361: 105413.
- Shanmugam G. 2016. Submarine fans: a critical retrospective (1950–2015). *Journal of Palaeogeography*, 5(2): 110–184.
- Song Y, Xu J, Liu H, Chen H. 2024. Eocene to Miocene sediment provenance features and evolution history of the western slope area in the Xihu Sag of the East China Sea Shelf Basin. *Australian Journal of Earth Sciences*, 71(5): 740–755.
- Vincent S J, Hyden F, Braham W. 2014. Along-strike variations in the composition of sandstones derived from the uplifting western Greater Caucasus: causes and implications for reservoir quality prediction in the Eastern Black Sea. *Geological Society, London, Special Publications*, 386: 111–127.

- Wang J L, Wu C D, Li Z, Zhu W, Zhou T Q, Wu J, Wang J. 2018. The tectonic evolution of the Bogda region from Late Carboniferous to Triassic time: evidence from detrital zircon U-Pb geochronology and sandstone petrography. *Geological Magazine*, 155(5): 1063–1088.
- Wang J L, Wu C D, Zhou T Q, Zhu W, Zhou Y X, Jiang X, Yang D S. 2019. Source-to-sink analysis of a transtensional rift basin from syn-rift to uplift stages. *Journal of Sedimentary Research*, 89(4): 335–352.
- Wang X J, Song Y, Bian B L, Zhao J M, Zhang H, Yan M D, Pei S P, Xu Q, Wang S J, Liu H B, Ju C H. 2021. Basement structure of the Junggar Basin. *Earth Science Frontiers*, 28(6): 235–255.
- Weltje G J, von Eynatten H. 2004. Quantitative provenance analysis of sediments: review and outlook. *Sedimentary Geology*, 171: 1–11.
- Yang H F, Qian G, Zhao M, Gao Y F, Su W, Xu Y H. 2023. Sediment supply mechanism and its influence on hydrocarbon accumulation in the Paleogene of the northern Huanghekou Sag, Bohai Bay Basin, China. *Journal of Palaeogeography*, 12(2): 229–245.
- Zhao R, Zhang J Y, Zhou C M, Zhang Z J, Chen S, Stockli D F, Olariu C, Steel R, Wang H. 2020. Tectonic evolution of Tianshan-Bogda-Kelameili mountains, clastic wedge basin infill and chronostratigraphic divisions in the source-to-sink systems of Permian-Jurassic, southern Junggar Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 114: 104200.

(责任编辑 李新坡)

《古地理学报》2027 年

“羌塘地区中生代古地理与油气资源”专辑征稿

羌塘盆地是中国陆上大型低勘探程度海相含油气盆地，完整记录特提斯洋演化与中生代构造沉积演变过程，具备优越油气成藏条件。依托第二次青藏高原综合科考等项目，该区已取得大量新数据与新认识，但在地层对比、古地理重建、构造改造、油气成藏差异性等方面仍存在诸多争议。为梳理前沿进展、破解关键科学问题，推动古地理理论与高原油气勘探融合，本刊特组织本专辑，征集羌塘及邻区中生代（三叠纪侏罗纪白垩纪）相关原创论文与高水平综述。

征稿方向（包括但不限于）：

1. 中生代地层精细划分对比、年代厘定、沉积序列及构造-地层耦合；
2. 古生物群落、古气候、古水体环境及生物-沉积-构造协同演化；
3. 沉积体系、沉积相、物源、古地貌恢复及其对烃源岩、储集层的控制；
4. 盆山耦合、断裂构造、盆地变形与构造运动对古地理格局的改造；
5. 古地理演化与烃源岩、储盖层，古油藏、成藏规律及资源潜力评价。

稿件要求：须为未公开发表原创成果或综述，紧扣专辑主题，遵守本刊投稿规范，数据可靠、论证严谨，突出理论创新或勘探应用价值，严禁一稿多投及学术不端。

投稿及时间：登录《古地理学报》官网（<http://www.gdxb.cn/>）在线投稿，投稿时“专题专辑信息”选项请选定本专辑。**截稿日期 2027 年 4 月 30 日**，择优录用后计划于 2027 年第 4 期集中出版。

联系人：彭楠、李素萍、王玉冲、旷红伟、李新坡

邮 箱：pengnan19830120@126.com；lisuping@cags.ac.cn；yuchongwang@foxmail.com；kuanghw@126.com；gdxb_ch@163.com

《古地理学报》编辑部

2026-09-01