

近物源咸化湖盆沉积特征及其控制因素： 以吉木萨尔凹陷北斜坡二叠系芦草沟组一段为例*

于海跃¹ 陈珺朗² 康积伦¹ 刘小洪² 马 强¹
林 潼³ 冯明友² 尚俊鑫² 曹 娟¹

1 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院, 新疆哈密 839009

2 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川成都 610500

3 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘 要 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组是准噶尔盆地全油气系统勘探的重要层系, 湖盆中心区致密油勘探已经取得了丰富认识, 然而针对凹陷斜坡区(尤以北部斜坡区)的研究较少, 致使对沉积相的分布及控因不明确, 制约了该区的勘探拓展。综合利用岩心、薄片、测井及地球化学资料, 对芦草沟组一段沉积体系进行系统研究。结果表明: 研究区芦草沟组一段属陆源碎屑岩、碳酸盐岩及混积岩等复杂岩性组合形成的扇三角洲—咸化湖泊沉积, 发育扇三角洲前缘、碎屑浅湖与混合浅湖 3 种亚相, 并可进一步识别出水下分流河道、滩坝及云(灰/藻)坪等 7 种微相。纵向上总体呈湖侵体系下碎屑岩减少、碳酸盐岩增多的演化序列; 平面上由北向南发育扇三角洲、碎屑浅湖及混合浅湖沉积, 且混合浅湖范围随湖平面上升而扩大。吉北斜坡芦一段沉积主要受古构造约束下的物源供给及微古地貌、干旱炎热气候下的高古盐度及浅水环境共同控制, 滩坝及云坪为有利沉积相带; 最终建立了“碎屑岩-碳酸盐岩-微生物岩”复合沉积模式, 为吉北斜坡区全油气系统研究提供地质依据。

关键词 准噶尔盆地 吉木萨尔凹陷 二叠系 芦草沟组 咸化湖盆 沉积相

第一作者简介 于海跃, 男, 1994 年生, 2019 年毕业于中国石油大学(北京), 获硕士学位, 现从事油气田勘探研究。E-mail: 1213459914@qq.com。

通讯作者简介 冯明友, 男, 1981 年生, 博士, 副教授, 研究方向为储层地质学。E-mail: fmyswpu@163.com。

中图分类号: P588.21 文献标志码: A

Sedimentary facies and controlling factors in proximal saline lacustrine basin: a case study of the Member 1 of Permian Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag, Junggar Basin

YU Haiyue¹ CHEN Junlang² KANG Jilun¹ LIU Xiaohong² MA Qiang¹
LIN Tong³ FENG Mingyou² SHANG Junxin² CAO Juan¹

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

2 School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

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

* 中国石油天然气股份有限公司科技项目(编号: 2023ZZ24YJ01)资助。[Financially supported by the PetroChina Science and Technology Project (No. 2023ZZ24YJ01)]

收稿日期: 2025-10-24 改回日期: 2026-01-05

Abstract The Permian Lucaogou Formation within the Jimsar sag represents a significant target for whole petroleum system exploration in the Junggar Basin. Significant achievements have been made in the exploration of tight oil within the central region of the lake basin. Nevertheless, the distribution patterns and primary controlling factors of sedimentary facies in the northern slope of the Jimsar sag remain inadequately understood. This study systematically examines the sedimentary system of the Member 1 of the Lucaogou Formation (P_2l_1) through an integrated analysis of core samples, thin sections, well log data, and geochemical information. The findings indicate that P_2l_1 is characterized by fan delta to saline lacustrine deposits, comprising terrigenous clastic rocks, carbonate rocks, and mixed carbonate-siliciclastic rocks. Three subfacies have been identified: fan delta front, clastic shallow lacustrine, and mixed shallow lacustrine, which can be further subdivided into seven distinct microfacies, including underwater distributary channels, beach bars, and (dolomitic/carbonate/algal) flats. Vertically, the succession reveals an evolutionary sequence transitioning from terrigenous clastic rocks to limestone, followed by dolostone, within a transgressive systems tract. The facies distribution demonstrates a north-to-south transition from fan delta to clastic shallow lake, and subsequently to mixed shallow lake, with the mixed shallow lake expanding in response to rising lake levels. The sedimentation processes of P_2l_1 in the northern slope were predominantly influenced by factors such as provenance, palaeogeomorphology, palaeosalinity, and oxidizing shallow-water conditions associated with an arid-hot climate. A “clastic-chemical-microbial” sedimentary model has been established, thereby providing a foundational framework for further research on the whole petroleum system in the northern slope region.

Key words Junggar Basin, Jimsar sag, Permian, Lucaogou Formation, saline lacustrine, sedimentary facies

About the first author YU Haiyue, born in 1994, graduated from China University of Petroleum (Beijing) in 2019 with a Master's degree. He is engaged in petroleum exploration and research. E-mail: 1213459914@qq.com.

About the corresponding author FENG Mingyou, born in 1981, is a Ph.D. and associate professor. He is mainly engaged in research on reservoir geology. E-mail: fmyswpu@163.com.

0 引言

陆相湖盆因细粒沉积发育、有机质富集且储集层类型多样,已成为全球常规—非常规油气(尤其是全油气系统)勘探开发的热点(贾承造, 2017; 王小军等, 2023)。随着近年来准噶尔盆地玛湖凹陷二叠系风城组、鄂尔多斯盆地三叠系延长组、松辽盆地白垩系青山口组及准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组等油气勘探获重大突破(匡立春等, 2012; 支东明等, 2024),展现出陆相湖盆巨大勘探开发前景(贾承造, 2017; 周杰等, 2025)。国内外学者针对陆相湖盆开展了大量野外露头、现代沉积及钻井取心研究,在湖泊相及其内部储集体的沉积环境与沉积响应(李红斌等, 2022)、古地理位置、物源供给及水动力条件对湖泊的控制作用(殷志强等, 2008; 杨华等, 2010;

陈世悦等, 2017)等方面进展显著。此外,部分学者针对湖盆边缘三角洲及重力流沉积等近源湖盆沉积开展了深入的岩石分类、成因机制和主控因素研究(张少敏等, 2018; 李攀等, 2024)。鉴于陆相湖盆三角洲—浅湖沉积受湖平面变化影响明显(Lettéron *et al.*, 2018; 曹娟等, 2025),尤其是近源咸化湖盆的湖平面受水体盐度、碎屑输入量、古地形、水动力条件、气候驱动及构造事件等制约明显,砂体发育特征及主要控制机理复杂(Scholle and Spearing, 1982; Della, 2015; 王剑等, 2022; 宋光永等, 2024),针对其沉积体系及发育规律的研究仍待加强(柳波等, 2015; 朱柏宇等, 2024)。

准噶尔盆地吉木萨尔芦草沟组页岩油勘探近年来取得重大突破,多口井获得工业油流(吴宝成

等, 2024)。其中, 近期于吉木萨尔凹陷北部斜坡带(吉北斜坡)芦草沟组获高产油流, 表明近物源区油气勘探开发潜力较大。前人对吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积相研究存在较多争议, 有半深湖—滨浅湖(张健等, 2003)、湖泊—三角洲(邵雨等, 2015)及深湖—浅湖沉积(李书琴等, 2020; 朱柏宇等, 2024)等不同观点; 且受控于钻井资料限制, 吉北斜坡区芦草沟组研究尚不够系统。以吉北斜坡芦草沟组为研究对象, 结合测/录井资料、岩心观察、薄片鉴定、X 射线衍射及相关分析化验资料, 系统剖析岩石学及沉积环境特征, 为厘清近源咸化湖盆沉积格局提供地质依据。

1 地质背景

吉木萨尔凹陷地处准噶尔盆地东南缘, 南北分别以三台断裂及吉木萨尔断裂为界, 西部以老庄湾断裂和西地断裂为界, 向东过渡为古西凸起, 为一

个受边界断裂控制的箕状凹陷, 整体呈现“西深东浅、西断东超”的格局(图 1-a), 构造单元面积为 1278 km^2 (李书琴等, 2020)。研究区石炭纪发育以火山岩为基底的碎屑岩夹层, 并于晚石炭世遭受陆内构造变形及剥蚀(郑孟林等, 2018)。中二叠世再次沉降, 并依次沉积了炎热干旱气候下的井井子沟组(P_{2jj})、芦草沟组(P_{2l})和梧桐沟组(P_{3wt})河流—湖泊相沉积(支东明等, 2023)。随后三叠纪为湿润河/湖相, 后遭印支运动剥蚀; 侏罗纪至新生代, 气候趋于干旱, 沉积序列依次为侏罗纪煤系与河/湖相、白垩纪浅水湖泊相以及新生代薄层河/湖相沉积(陈旋等, 2025)。吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组是准东地区重要的页岩油含油层系(张少敏等, 2018)。芦草沟组全凹陷发育, 呈“西厚东薄、南厚北薄”特征, 厚度介于 $200 \sim 350 \text{ m}$ 之间, 具有“源—储紧邻、近源成藏”的特征(支东明等, 2024)。芦草沟组沉积期以干

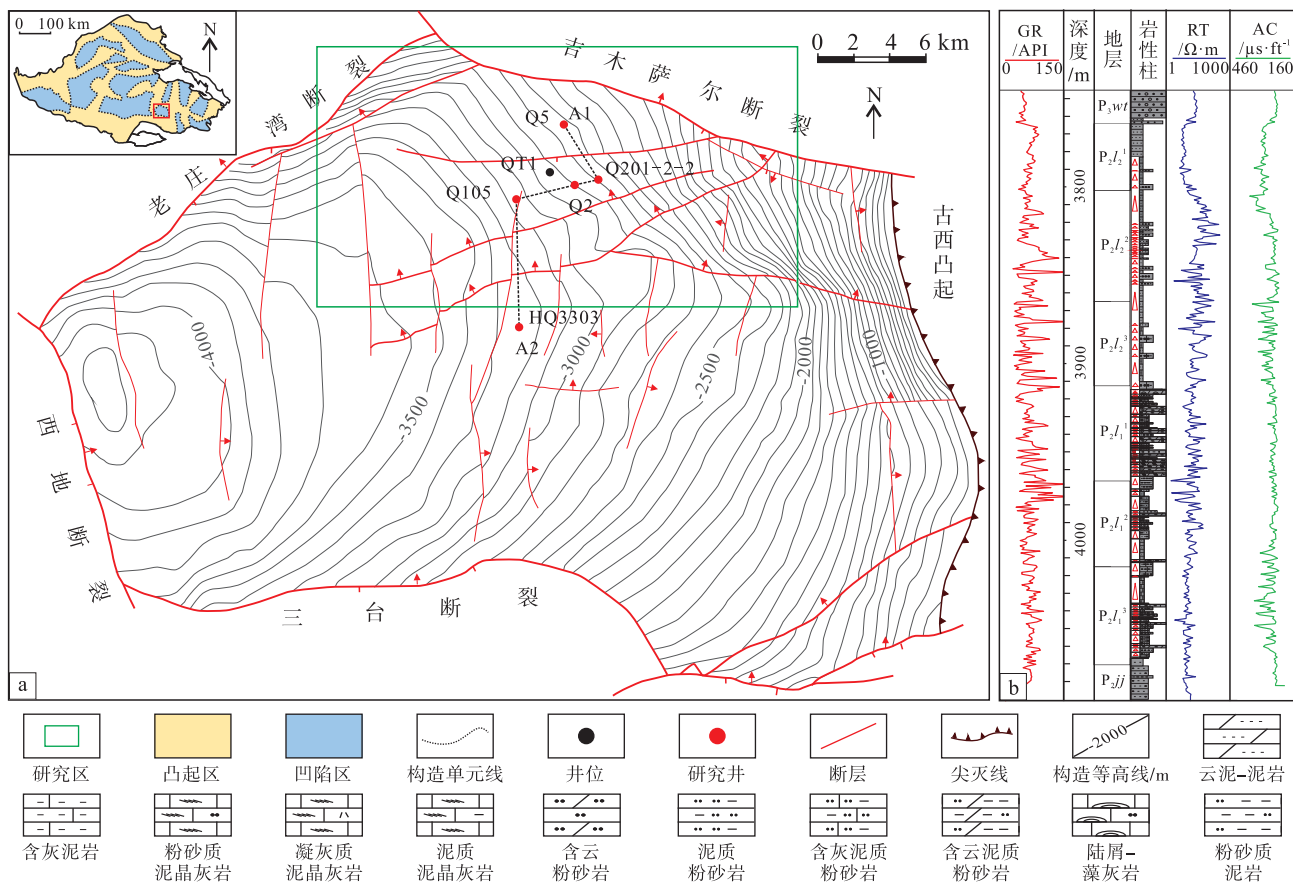


图 1 吉木萨尔凹陷构造位置 (a) (芦草沟顶构造等高线) 及芦草沟组综合柱状图 (b) (据陈旋等, 2025; 有修改)

Fig. 1 Simplified tectonic location (a) (including contours of top structure) and strata column of the Permian Lucaogou Formation (b) in northern slope of Jimsar sag (modified from Chen *et al.*, 2025)

旱气候下的欠补偿咸化湖盆为特征，伴随频繁的火
山活动与藻类大量繁殖（曲长胜等，2017），形成
了多物源混合沉积岩（张少敏等，2018）。

根据岩性特征等，芦草沟组自下而上可划分为
芦一段（ P_2l_1 ）及芦二段（ P_2l_2 ）共 2 个段， P_2l_1
与 P_2l_2 分界面为最大湖泛面。芦一段为本次研究
重点层段，由下至上可进一步划分为 $P_2l_1^3$ 、 $P_2l_1^2$ 、
 $P_2l_1^1$ 共 3 个砂组（图 1-b），分别对应 3 期湖侵正旋
回。吉北斜坡区 $P_2l_1^3$ 砂组以陆源输入为主，主要
发育粉砂岩及细砂岩，偶见砾岩沉积（北部 Q5
井）； $P_2l_1^2$ 砂组以藻灰岩沉积为主，见泥晶灰岩与
藻灰岩互层，近物源处见明显的正混积岩沉积；
 $P_2l_1^1$ 砂组则以（粉砂质）泥岩与泥质白云岩互层
为主。

2 岩石及沉积构造特征

2.1 岩石学特征

开展了 234 块岩心样品的薄片鉴定和 390 块样
品的全岩 X 射线衍射（XRD）分析。结果表明，
吉木萨尔凹陷北斜坡芦草沟组一段岩性复杂，包含
陆源碎屑为主的砂/砾岩、碳酸盐岩及混积岩
（表 1）。矿物成分主要包含斜长石、钾长石、石
英、黏土矿物、白云石、方解石和黄铁矿等。其
中，长石含量最高（主要为斜长石及钾长石），其
中斜长石最高含量达 54%（平均为 31%），钾长石
含量较低（平均为 4%）。碳酸盐矿物主要包括白
云石和方解石、矿物含量差异较大，方解石含量为
0~83%，白云石含量为 0~77%。黏土矿物整体含
量较低，最高为 39%（表 1）。岩心及薄片观察表
明，区内芦一段岩石主要由陆源碎屑颗粒、化学成
因碳酸盐矿物及生物成因碳酸盐矿物组成，含黏土
矿物及火山碎屑组分且混合沉积明显。

其中，陆源碎屑是芦草沟组一段主要的碎屑成

分（图 2-a），主要成分为石英、长石及岩屑，粒
度从粉砂级至砾级均有分布。石英碎屑总体具棱角
状一次棱角状，分选较差、结构成熟度较低；长石
碎屑以钠长石为主；岩屑以火山岩岩屑及内碎屑为
主，火山岩岩屑呈次圆状、分选差、结构成熟度较
低（图 2-b）。此外，内碎屑颗粒粒度变化较大，
从砾屑至粉屑均有分布，以细砂—粉砂级为主，分
选中等，磨圆程度较好，圆一次圆状、可见次棱角
状。区内碎屑岩主要包含砾岩、细—粗砂岩、粉砂
岩及泥岩。

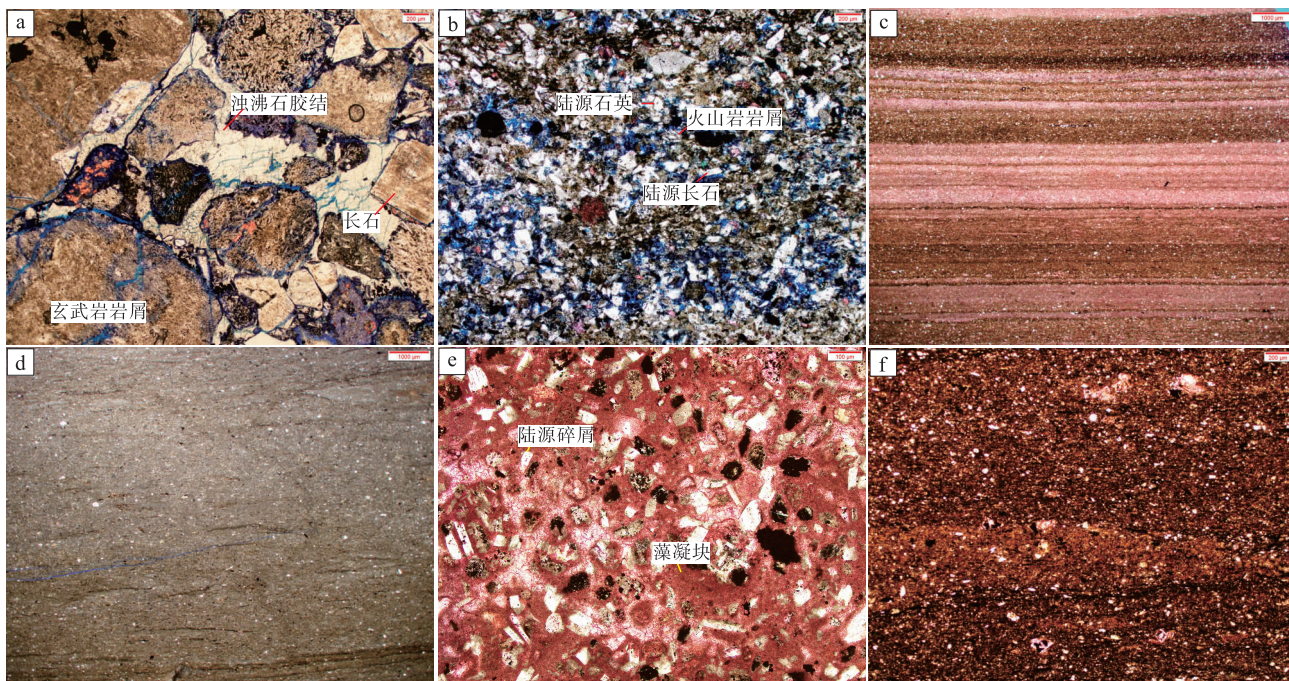
化学沉淀碳酸盐由碳酸盐过饱和析出、具有化
学成因的碳酸盐颗粒组成，如碳酸盐灰泥和碳酸盐
粒屑等。芦草沟组一段化学成因碳酸盐主要为云
（灰）泥（ $<4\mu\text{m}$ ）及粉晶（ $4\sim10\mu\text{m}$ ），化学沉
淀碳酸盐岩主要为泥晶白云岩、泥晶灰岩、晶粒白
云岩（图 2-c，2-d，2-e）及云（灰）泥（图 2-f）。
微生物成因碳酸盐依据内部结构及宏观结构（微
生物形态等）共识别出 2 类微生物成因碳酸盐组
分，分别为藻粒及藻凝块。藻粒是指与藻类有成因
联系的碳酸盐颗粒，包括藻团粒及或藻内碎屑等，
与中—高能水动力环境有关（鄢伟等，2023）；藻
凝块为微生物凝块及障积沉积物，其组分主要为藻
球粒，其次是藻团块、微生物席、藻屑、藻黏连组
构（EPS），发育不规则状窗格结构。区内微生物
成因碳酸盐岩主要为藻颗粒灰（云）岩，偶见藻
纹层灰（云）岩。

混积岩以粉砂（砂）-（藻）颗粒灰岩为主，该
类岩性陆源碎屑与碳酸盐成分相当（2 类组分含量
均在 50% 左右），碳酸盐组分主要为灰泥及藻颗
粒，可见藻格架孔，为内碎屑颗粒及陆源物质被微
生物捕获而形成。粉砂—藻颗粒灰岩总体为块状层
理构造，厚度通常为 0.1~0.2 m；微观上，见藻丝
粘结陆源碎屑、内碎屑及近源搬运破碎的藻粒，颗
粒大小为 0.1~2 mm；陆源碎屑组分以粉砂及砂屑

表 1 吉北斜坡芦草沟组一段 X 射线衍射分析结果

岩性	矿物成分及含量/%							
	方解石	白云石	石英	长石	黏土矿物	方沸石	浊沸石	黄铁矿
陆源碎屑岩	0~27(12.6)	0~21(9.8)	11~40(14.6)	24~64(45.2)	4~39(11.0)	0~10(0.6)	0	0~4(0.4)
碳酸盐岩类	0~83(36.5)	0~77(35)	5~10(9.25)	1~27(15.6)	0~3(1.4)	0	0~18(1.8)	0~1(0.3)
混积岩	7~68(44.8)	0~18(4.3)	7~24(20.4)	6~55(31.4)	0~20(3.9)	0~1(0.1)	0	0~2(0.8)

注：0~27(12.6)为“最小值~最大值(平均值)”。



a—浊沸石胶结不等粒砂岩, 单偏光, Q5 井, 井深 3363.97 m; b—泥质粉砂岩, 单偏光, Q201-2-2 井, 井深 3432.73 m; c—水平纹层状泥质泥晶灰岩, 单偏光, Q105 井, 井深 3732.35 m; d—含粉砂粉晶白云岩, 单偏光, J3301 井, 井深 3430.25 m; e—粉砂质藻颗粒灰岩, 单偏光, Q201-2-2 井, 井深 3418.06 m; f—灰质泥岩, 单偏光, Q105 井, 井深 3711.44 m。所有薄片均茜素红及混合液染色, 蓝色环氧化树脂铸体

图 2 吉木萨尔凹陷北斜坡区芦草沟组典型岩石类型特征

Fig. 2 Typical microphotos of petrography of the Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag

为主, 因遭受强烈溶蚀形成明显的铸模孔, 藻粒及陆屑颗粒间见亮晶胶结方解石。

2.2 沉积构造特征

沉积构造特征可反映沉积岩形成时沉积介质性质、流体水动力条件、沉积物搬运特征及形成方式(朱柏宇等, 2024)。重点取心井观察表明, 研究区机械成因及生物成因相关沉积构造较为发育(图 3)。

其中, 吉北斜坡区芦草沟组一段砾岩及不等粒砂岩多发育块状层理及正粒序层理, 该类岩性颗粒较大, 分选、磨圆较差且杂基含量较高(图 3-a, 3-b), 具快速卸载、近源强水动力特征, 多反映扇三角洲沉积; 受强水动力影响, 粗粒砂岩交错层理发育(图 3-c)。此外, 浅灰色粉砂岩发育于距物源远、沉积物卸载速度慢且稳定、水动力较弱的沉积环境, 波纹层理发育, 见液化变形层理(图 3-d, 3-e, 3-f); 暗色粉砂质泥岩中夹少量浅色透镜状一波纹泥质粉砂岩及粉砂岩(图 3-g)。此外, 粉砂质白云岩(灰岩)受湖浪影响, 发育透镜状一波纹层理(图 3-h), 部分粉晶白云岩中见生物

介壳(图 3-i)。

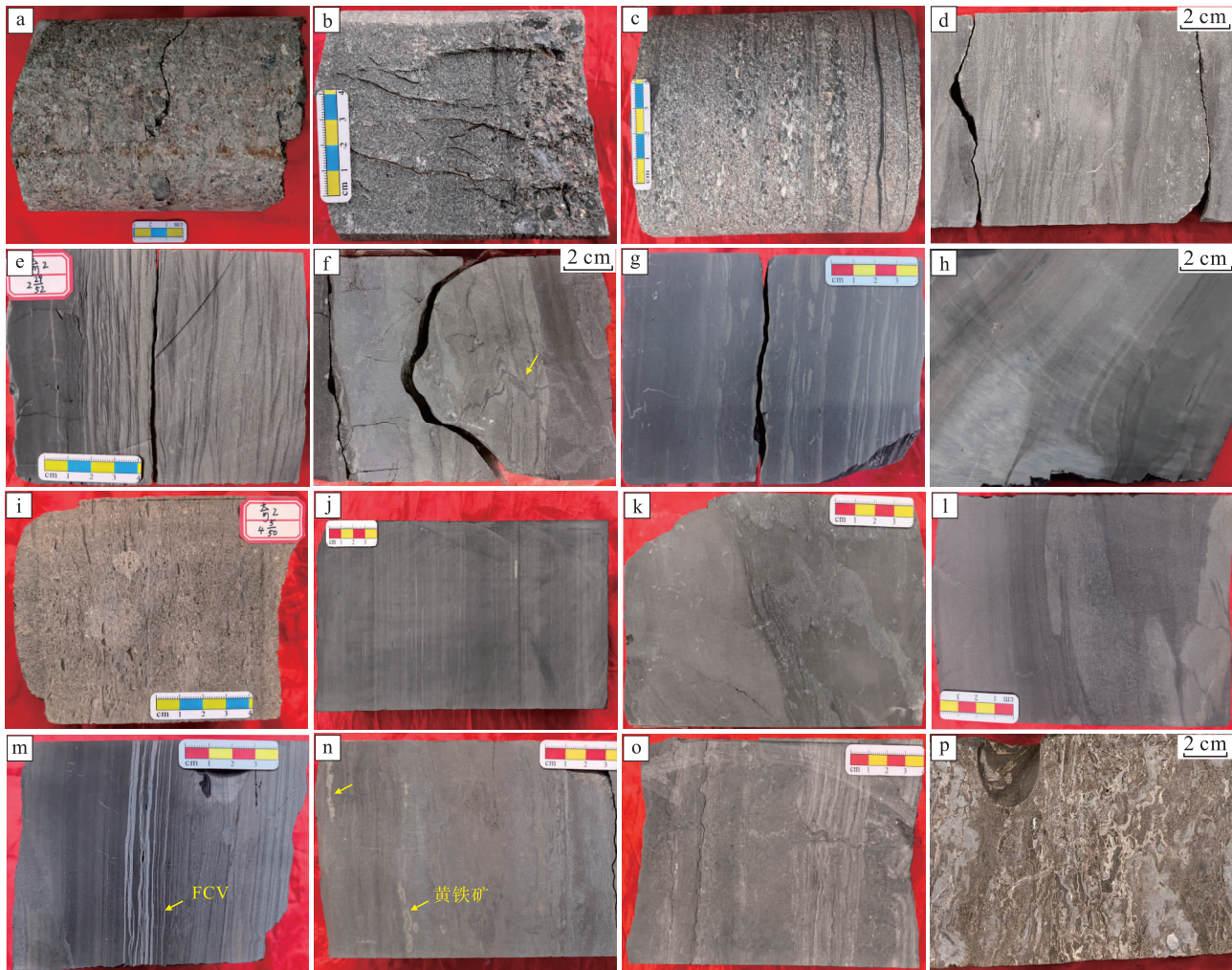
区内泥岩多发育水平层理(图 3-j, 3-m), 见生物扰动构造及液化变形(图 3-k, 3-l), 偶见炭屑, 反映静水还原环境。泥晶白云岩及泥晶灰岩中见水平层理及液化变形构造(图 3-o), 可见富有机质泥岩生烃作用形成的纤维状方解石脉体(图 3-m; 冯明友等, 2022)。另外, 黄铁矿团块/条带较发育(图 3-n; 朱柏宇等, 2024)。微生物碳酸盐岩多见藻粘结陆源碎屑颗粒特征、窗格构造发育(图 3-p), 指示受陆源碎屑影响的浅水沉积。

3 沉积相划分及空间展布特征

3.1 沉积相划分及特征

结合区域沉积演化背景、岩心、录井及测井曲线特征, 认为吉木萨尔凹陷北部斜坡区芦草沟组一段属扇三角洲—咸化湖泊沉积体系, 进一步分为 2 个相、3 个亚相及 7 个微相(表 2)。

其中, 扇三角洲相沉积以扇三角洲前缘亚相沉积为主, 该类岩相分布范围较局限, 垂向厚度较



a—灰色砾岩，块状层理，J3801 井，井深 2699.38 m；b—灰色不等粒砂岩，正粒序层理，Q5 井，井深 3315.34 m；c—灰色不等粒砂岩，交错层理，Q5 井，井深 3312.99 m；d—深灰色粉砂岩，波纹层理，Q105 井，井深 3754.89 m；e—深灰色泥质粉砂岩，波纹层理，Q2 井，井深 3275.72 m；f—液化变形，Q105，井深 3739.22 m；g—深灰色泥质粉砂岩夹透镜状构造粉砂岩，Q105 井，井深 3718.08 m；h—透镜状灰岩，Q201-2-2 井，井深 3445.5 m；i—生屑白云岩，Q2 井，井深 3362.58 m；j—深灰色泥岩，水平层理，HQ3303 井，井深 3981.35 m；k—生物扰动，Q105 井，井深 3750.08 m；l—生物扰动，Q105 井，井深 3728.38 m；m—水平层理泥岩内夹纤维状方解石脉（FCV），Q105 井，井深 3732.55 m；n—黄铁矿条带，Q105 井，井深 3733.56 m；o—泥晶白云岩发育液化变形构造，HQ3303 井，井深 3974.43 m；p—灰色藻凝块灰岩，波纹层理，见窗格孔，Q201-2-2 井，井深 3421.56 m

图 3 吉木萨尔凹陷北斜坡芦草沟组典型岩石类型及沉积构造

Fig. 3 Macrophotos of typical petrography and sedimentary structures of the Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag

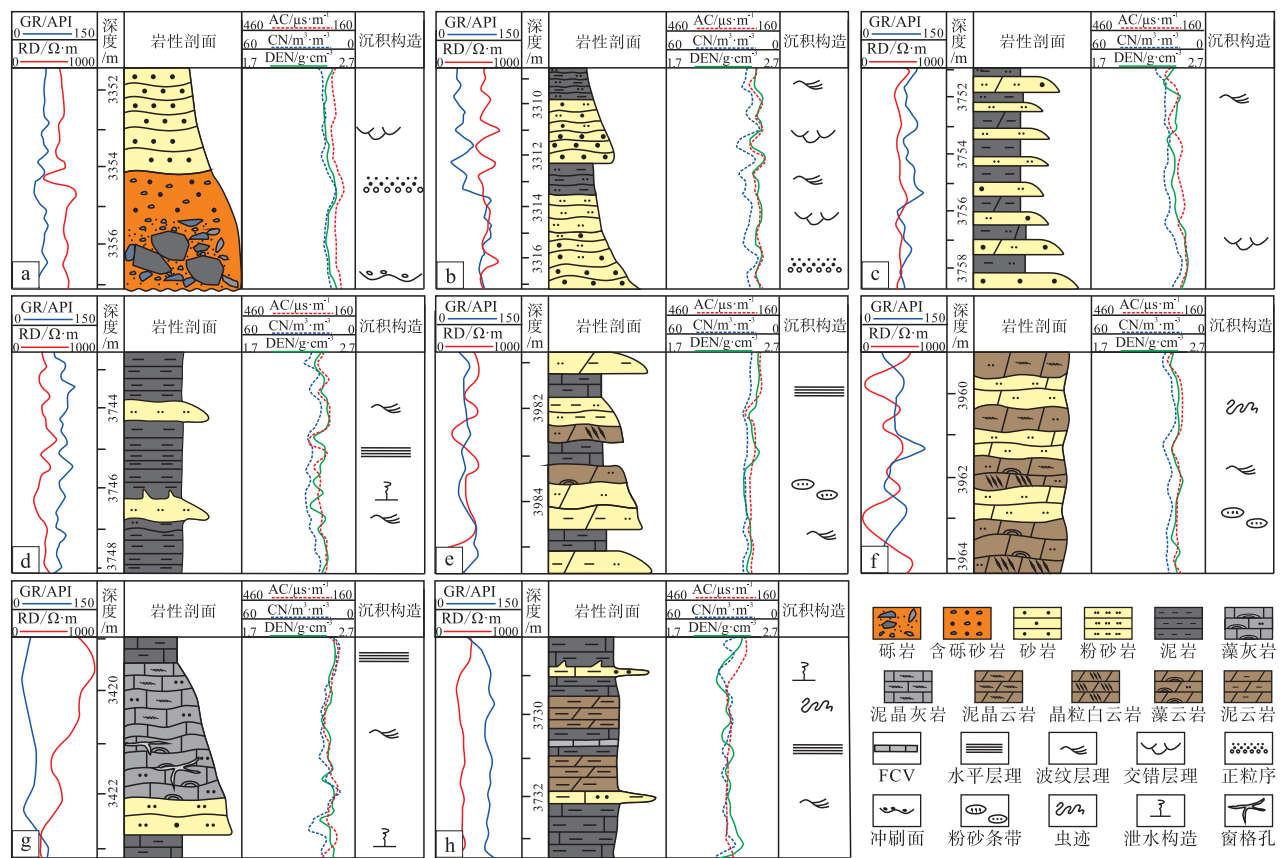
大，主要发育水下分流河道及水下分流河道间微相。水下分流河道以厚层块状层理砂砾岩为主，成分为长石、石英及火山岩岩屑，含泥晶灰岩内碎屑，分选较差，结构成熟度较低。底部见冲刷面，上部发育正粒序层理，形成于快速卸载、近源强水动力环境；块状层理砾岩基质以灰泥为主，见亮晶方解石或浊沸石胶结物。水下分流河道测井曲线以钟-箱型中—低 GR（自然伽马）、中—高电阻率、中 AC（声波时差）及中高密度为特征（图 4-a）。

区内分流河道砂砾岩钙质胶结强，总体物性中等—差且非均质性强。分流河道间底部见交错层理砂岩，向上变为粉砂岩夹泥岩。砂岩成分以长石及石英为主，含火山岩岩屑、藻颗粒及内碎屑，分选较好，颗粒为次圆状，结构成熟度中等，颗粒间以绿泥石胶结及钙质胶结为主。发育于距离物源较远、沉积物卸载速度较慢但水动力中等的沉积环境。分流河道间电阻率低于水下分流河道，具高声波时差、中密度特征（图 4-b）。

表 2 吉木萨尔凹陷北斜坡芦草沟组沉积相分类

Table 2 Classification of sedimentary facies of the Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag

相	亚相	微相	岩相组合	沉积构造	测井响应特征
扇三角洲	前缘	水下分流河道	块状/交错层理(含砾)粗砂岩、块状层理砾岩	块状层理、正粒序层理、冲刷面构造	GR 低值、RT 高值,钟-箱型
		水下分流河道间	含灰细—中砂岩夹粉砂岩、含砂屑藻颗粒灰岩	波纹层理、交错层理	GR 中—低值、RT 变化较大,低幅线型
碎屑浅湖	碎屑	碎屑浅湖泥	泥岩、粉砂岩	发育水平层理、缝合线和液化变形,局部见生屑	GR 高值、RT 中高值,低幅线型
		碎屑滩坝	粉细砂岩、砂岩	沙纹层理、交错层理、(粉砂)灰岩条带	GR 中-高值、RT 中低值,漏斗型
咸化湖泊	混合浅湖	混合滩坝	粉细砂岩、粉砂质白云岩、混积岩	沙纹层理、交错层理、(粉砂)灰岩条带、生屑	GR 中-高值、RT 中低值,漏斗型
		(云/灰/藻)坪	泥晶白云岩/灰岩与波纹层理粉砂岩、陆屑藻粒灰岩、混积岩	沙纹/交错层理、藻粘结及窗格孔、(粉砂)灰岩条带	GR 高值、RT 中值
		混合浅湖泥	水平/块状层理泥岩、泥晶白云(灰)岩	波纹层理、水平纹层及纤维状方解石脉,局部见黄铁矿	GR 高值、RT 中—高值,齿型



a—扇三角洲前缘水下分流河道, Q5 井; b—扇三角洲前缘分流河道间, Q5 井; c—碎屑浅湖碎屑滩坝, Q105 井; d—碎屑浅湖泥, Q105 井; e—混合浅湖混合滩坝, HQ3303 井; f—混合浅湖藻云坪, HQ3303 井; g—混合浅湖藻灰坪, Q201-2-2 井; h—混合浅湖泥, Q105 井

图 4 吉木萨尔凹陷北斜坡芦草沟组沉积微相岩性序列及测井响应

Fig. 4 Lithological succession and response of well-logging curve of various sedimentary microfacies in the Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag

咸化湖泊（包括前扇三角洲）可划分为碎屑浅湖及混合浅湖 2 种亚相。其中，碎屑浅湖亚相位于水体较浅区域，物源以陆源碎屑为主，分布于湖

面枯水期最低水平面至浪基面之间，含碎屑滩坝和碎屑浅湖泥 2 个微相。其中，碎屑滩坝由较粗陆源碎屑组成，以陆源碎屑粉砂岩为主、含少量细砂

岩；区内碎屑滩坝近源碎屑供应充分，以湖浪及其所派生沿岸流作用为主要动力机制，沉积厚度较大、长石及石英较为发育，颗粒分选较好、次圆—圆状。碎屑滩坝测井曲线表现为齿型中—高值 GR、中等电阻率、中—高声波时差及中—低密度的特征（图 4-c）。相比而言，碎屑浅湖泥则以灰—黑色泥岩沉积为主，发育水平层理及波纹层理，见液化变形构造，指示弱水动力陆源碎屑沉积环境。碎屑浅湖泥测井响应特征为：GR 曲线以箱型、齿型中—高值为主，中—高电阻率、中—高声波时差及中等密度（图 4-d）。

混合浅湖亚相发育于浪基面至枯水期最低水平面之间的浅水区域，是碎屑浅湖与半深湖间的沉积过渡带。区内该亚相多表现为碎屑岩与咸化湖盆碳酸盐岩的混合沉积（相混合；Mount, 1984），主要沉积微相包括混合滩坝、云坪/灰坪/藻坪及混合浅湖泥。其中，混合滩坝沉积主要位于混合浅湖泥与云/灰/藻坪过渡区域，水动力条件中等，受潮浪影响明显，陆源输入中等。混合滩坝岩性以褐色、灰色云质（灰质）粉砂岩及粉砂质白云岩为主，总体呈带状或斑状分布，发育波纹层理及窗格构造，见生屑。混合滩坝测井曲线为钟型及漏斗型中—高值 GR 曲线、中—低电阻率、中—高声波时差及中等密度特征（图 4-e）。区内混合滩坝物性总体好但非均质性强，多为优质储集层发育的有利相带。

区内云（灰/藻）坪主要发育于碎屑供给不足、湖浪作用不强的较低能环境，水体循环及气候（蒸发）作用对其影响明显。主要岩性为泥晶灰岩与藻凝块灰岩互层、或泥晶白云岩与藻白云岩互层；多发育波纹层理及近水平层理，见虫迹及生物扰动构造，窗格孔较发育，总体物性高，为有利沉积相带；横向连续性中等，平面上呈连片状或点状分布。藻灰坪与藻云坪测井曲线差异较大。其中，藻云坪/云坪多呈高 GR、中—高电阻率值特征（图 4-f），而藻灰坪则以低 GR、高电阻率为主（图 4-g）。

此外，混合浅湖泥以深灰色含少量陆源碎屑的灰（云）泥沉积为主，发育水平层理及液化变形构造，含少量黄铁矿和纤维状方解石脉，水动力条件弱。测井响应为平直状高 GR、中—低电阻率、中—高声波时差及中等密度值特征（图 4-h）。

3.2 沉积相分布

沉积相对比分析表明（图 5），吉北斜坡区芦一段整体发育扇三角洲相及咸化湖泊相。扇三角洲相仅发育于吉北斜坡北部而咸化湖泊则广泛发育，且由下向上岩性以块状层理砂砾岩为主变为交错层理—波纹层理砂岩，表明陆源供给减弱、三角洲发育程度呈逐渐降低趋势。其中， $P_2l_1^3$ 砂组沉积期以水下分流河道—碎屑浅湖为主；吉北斜坡北部近物源区水动力强、陆源输入充分、水体较浅，发育砂砾岩为主的水下分流河道及分流河道间沉积；碎屑浅湖沉积粉砂级颗粒较多，滩坝发育程度高、横向较连续；远物源区（吉北斜坡西南部）水动力稍弱，混合浅湖则主要由粉砂质泥岩组成，滩坝发育程度稍低，垂向上主要分布于中上部、横向连续性较差。 $P_2l_1^2$ 砂组沉积期以混合浅湖沉积为主，吉北斜坡北部近源区陆源输入减弱、水动力中等，形成以泥晶灰岩、藻颗粒灰岩及粉砂岩为主的（藻）灰坪沉积，垂向上以薄互层间互、横向连续性较弱；远物源区（吉北斜坡南部）水动力偏弱、水体较深，混合浅湖泥沉积主要由灰质泥岩组成。 $P_2l_1^1$ 砂组沉积期继承早期混合浅湖沉积，近物源区陆源输入及水动力强度明显降低，形成以泥云岩沉积为主的云坪沉积，垂向沉积较厚、横向连续性高，见少量藻云坪发育于云坪及滩坝上部；远物源区水动力弱、化学沉积程度高，发育灰岩—白云岩互层的混合浅湖泥夹薄层云坪及滩坝沉积。

综合沉积相对比及地震预测成果，明确了芦一段早、晚 2 期沉积微相的平面分布（图 6）。结果表明， $P_2l_1^3$ 砂组时期陆源供给强，在北部 Q3-Q10-J3801 一带发育以砂砾岩为主的扇三角洲沉积，湖盆内总体为粉砂岩及粉砂质泥岩为主的碎屑浅湖沉积，深水处发育少量化学沉淀（灰质泥岩/云质泥岩）为主的混合浅湖沉积；受北部扇三角洲影响，吉北斜坡内东北部（Q2 井）、西南部（JX5-Q110 井）及东南部（J3301）发育较大面积的滩坝沉积，云坪微相则发育于滩坝周缘，形成粉砂岩夹薄层云质泥岩沉积（图 6-a）。 $P_2l_1^{2-1}$ 砂组沉积期湖平面上升，扇三角洲及碎屑浅湖发育萎缩，陆源输入减弱，岩性由砂砾岩变为细砂岩，混合浅湖面积向北部扩大。其中，近物源区（QT1-Q102-Q2 及 Q201-2-2 井一带）滩坝过渡为灰坪沉积，其顶部

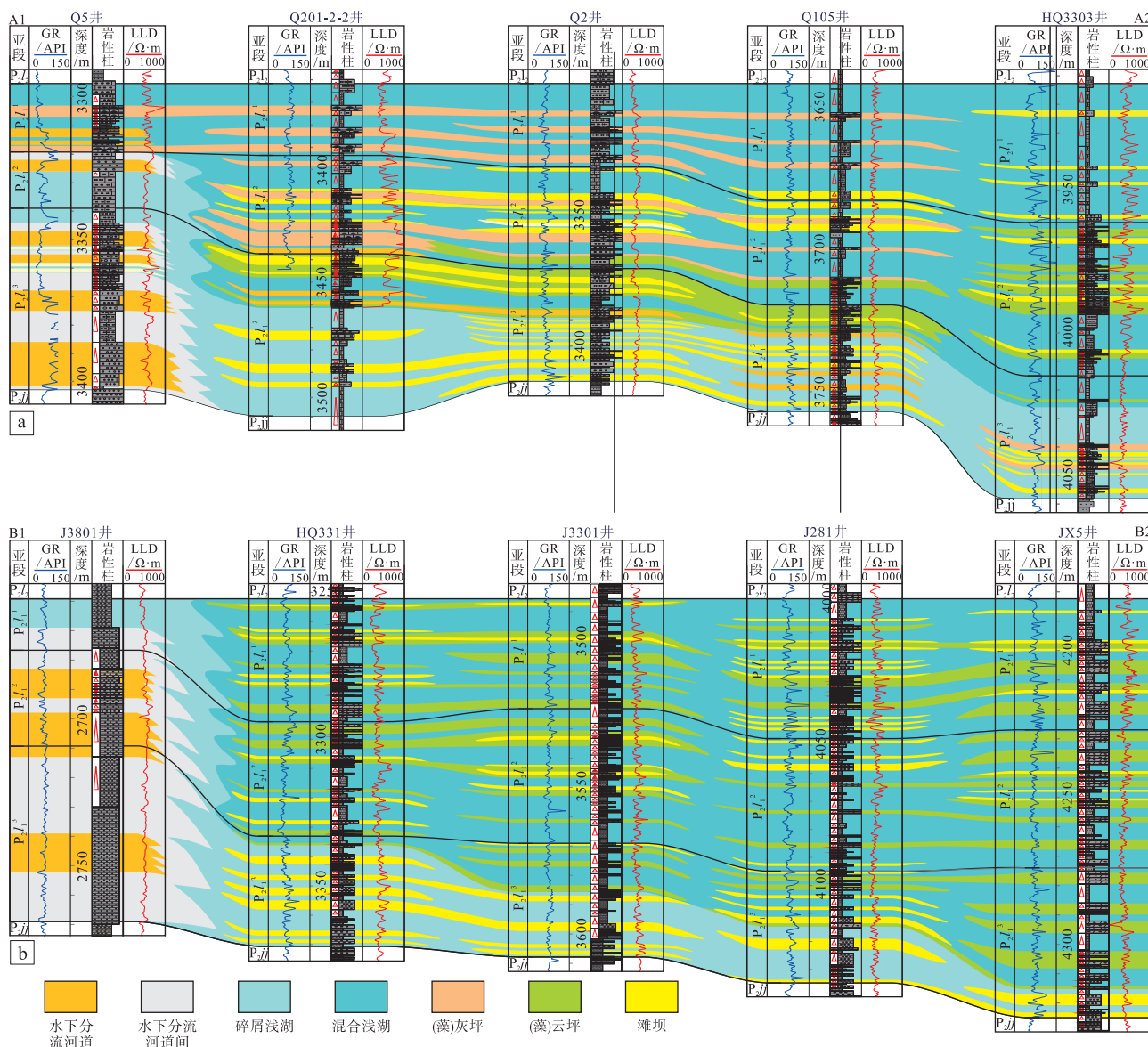


图 5 吉木萨尔凹陷北斜坡芦草沟组一段近南北 (a) 及北东—南西向 (b) 沉积相对比剖面图 (剖面位置见图 1)

Fig. 5 Comparison of sedimentary facies profiles of the Member 1 of Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag near north-south direction (a) and in northeast-southwest direction (b) (location seen Fig. 1)

发育藻灰坪, 岩性组合由粉砂岩沉积变为泥晶灰岩夹混积岩 (粉砂—藻灰岩) 或藻灰岩; 远物源区滩坝缩小、云坪面积扩大, 沉积物则变为以灰质泥岩夹泥云岩沉积为主 (图 6-b)。总体看来, 区内芦一段沉积相带变化受物源输入、水动力条件及水体深度影响明显。

综合地震及前人研究结果 (邓远等, 2024) 认为, 芦草沟组一段沉积期呈现“南低北高、中部低东西高”的古地貌格局。其中吉北斜坡最北部坡度最大, 发育以砂砾岩沉积为主的扇三角洲; 吉北斜坡中部, 于 Q102-Q2-Q201-2-2 及 JX35-

JX5 一带存在水下低幅隆起, 这些高部位则有利于灰/云坪及滩坝微相的发育, 其中由藻灰岩、泥质白云岩构成的灰/云坪发育在最高部位; 吉北斜坡南部古地貌整体偏低, 属古低洼区, 水体较深、水动力弱, 多发育混合浅湖泥微相的变形层理泥岩及灰泥沉积, 有机质含量较高。

4 讨论

4.1 湖盆沉积古环境

为厘清吉北斜坡区芦一段沉积期的气候、盐

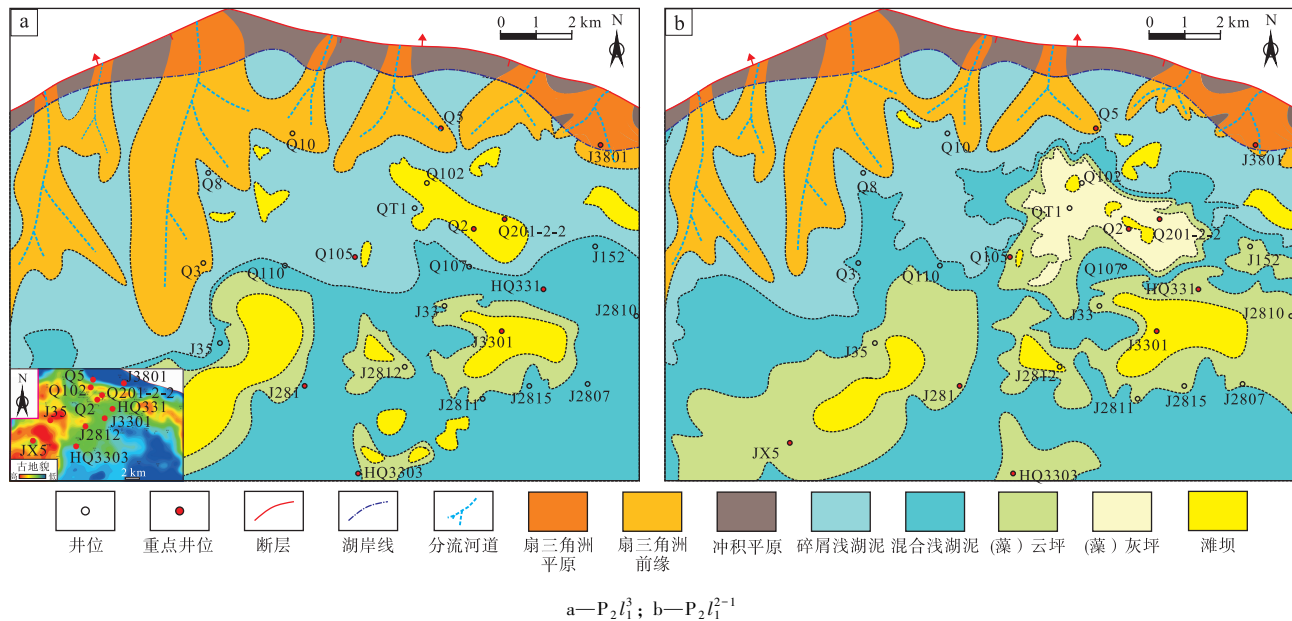


图 6 吉木萨尔凹陷北斜坡芦草沟组一段沉积微相平面分布

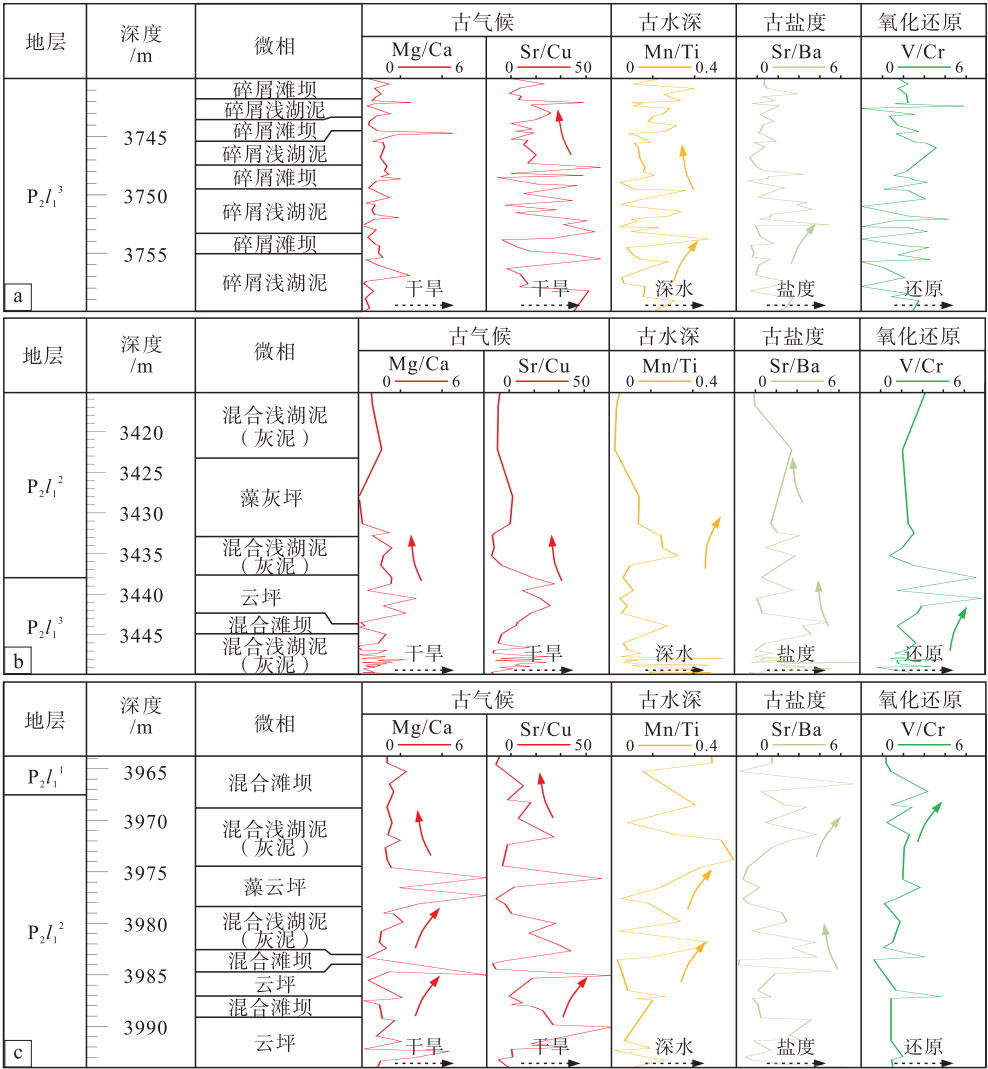
Fig. 6 Planar distribution of microfacies of the Member 1 of Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag

度、水深及氧化还原条件等古环境特征,结合岩心观察并利用取心井 XRF 资料开展系统分析(图 7-a, 7-b, 7-c)。

首先,潮湿气候下沉积岩中 Fe、Al、Cr、V、Ni 及 Co 等元素含量相对较高,而干燥气候受强烈蒸发影响导致 Ca、Mg、K、Na、Sr、Ba 及 Mn 等元素被析出而沉积。因此,以上元素的迁移及分配特征可半定量指示沉积环境气候条件(谭聪等, 2019; 刘翰林等, 2023)。其中, Sr/Cu 值及 Mg/Ca 值有效反映古气候特征。如 $1.3 < \text{Sr}/\text{Cu} < 5.0$ 指示温暖湿润气候、 $5.0 < \text{Sr}/\text{Cu} < 10.0$ 指示半潮湿—半干旱的气候、 $\text{Sr}/\text{Cu} > 10.0$ 则反映炎热干旱气候(王欢等, 2022)。区内 P_2L_1^3 、 P_2L_1^2 及 P_2L_1^1 沉积期 Sr/Cu 值平均值分别为 22.52、12.12 及 16.76 (均大于 10), 指示芦一段 3 个砂组沉积期均为干旱炎热气候。此外, Mg/Ca 值高指示干旱炎热气候、而值低则指示温暖湿润气候(朱柏宇等, 2024), 区内 P_2L_1^3 、 P_2L_1^2 及 P_2L_1^1 沉积期 Mg/Ca 平均值分别为 1.98、0.89 及 2.47, 表明芦一段 P_2L_1^3 及 P_2L_1^1 时期较 P_2L_1^2 沉积期更为干旱炎热。另外, 鉴于 Sr^{2+} 和 Ba^{2+} 在淡水体系中为可溶性重碳酸盐体系、 Sr^{2+} 在水体中迁移能力更强, 故低盐度时 Ba^{2+} 会首先沉淀、随后盐度升高导致 Sr^{2+} 沉淀(魏巍等, 2021)。当 $\text{Sr}/\text{Ba} < 0.5$ 时多指示淡水—微咸水

环境, $\text{Sr}/\text{Ba} > 0.5$ 则为咸水环境。区内 P_2L_1^3 、 P_2L_1^2 及 P_2L_1^1 沉积期 Sr/Ba 平均值分别为 1.74、1.59 及 2.06 (普遍高于 0.5), 指示芦一段沉积期盐度较高, 且干旱炎热气候进一步导致 P_2L_1^1 时期蒸发作用增加、水体盐度变大。

此外, 元素迁移过程中 Mn 元素比较稳定、而 Ti 等元素不太稳定, 故常用 Mn/Ti 值来表征古水深、且 Mn/Ti 值通常与水体深度呈正相关性(罗锦昌等, 2022)。区内 P_2L_1^3 、 P_2L_1^2 及 P_2L_1^1 沉积期 Mn/Ti 平均值分别为 0.13、0.14 及 0.16, 表明芦一段水体总体属浅水环境, 但水体逐渐变深。另外, 还原条件下 V 较易被吸附而沉淀、而 Cr 及 Ni 则相对较易富集, 因此可利用 V/Cr 值可有效判断水体氧化还原条件。当 $\text{V}/\text{Cr} < 2$ 时指示氧化环境、 $\text{V}/\text{Cr} > 4.25$ 反映缺氧环境(Hatch and Leventhal, 1992; Tribouillard *et al.*, 2006)。 P_2L_1^3 、 P_2L_1^2 及 P_2L_1^1 沉积期 V/Cr 平均值分别为 2.23、2.37 及 1.85, 指示芦一段 P_2L_1^3 及 P_2L_1^2 沉积期处于氧化—亚氧化环境, P_2L_1^1 沉积期则为强氧化环境。因此, XRF 结果指示芦一段 P_2L_1^3 及 P_2L_1^1 沉积期为干旱炎热、水体盐度高、氧化性较强的浅湖环境, P_2L_1^2 时期则为相对温暖潮湿、水体盐度较高的氧化—亚氧化浅湖环境。综合以上分析表明, 吉北斜坡芦一段总体属干旱炎热气候、高盐度、强氧化环境的产物(图 7)。



a—陆源输入为主沉积期（3740~3760 m，Q105 井）；b—石灰岩发育期（3415~3450 m，Q201-2-2 井）；
c—白云岩发育期（3963~3995 m，HQ3303 井）

图 7 吉木萨尔凹陷芦草沟组沉积微环境元素参数分析

Fig. 7 Analysis of sedimentary microenvironment elements of the Lucaogou Formation in Jimsar sag

4.2 湖盆时空分布及控制因素

吉北斜坡区芦一段沉积期物源主要来自于北部，受老庄湾断裂及吉木萨尔断裂影响，发育北部及北东向 2 个扇三角洲，沉积微相类型主要为三角洲前缘分流河道、滩坝及云（灰）坪沉积，自下而上经历了碎屑沉积—混合沉积的演化过程。

芦一段处于湖侵体系域（TST），沉积早期（ $P_2L_1^3$ ）水体较浅、陆源沉积供给较强、整体较炎热、水体盐度较高且湖盆水体蒸发量大于补给量，导致近源区扇三角洲砂砾岩大范围分布，盆缘发育陆源碎屑粉砂质泥岩，盆内则发育以白云岩为主的

云坪沉积（张文文等，2021）。芦一段中期（ $P_2L_1^2$ ）陆源输入减弱导致三角洲逐渐萎缩，气候整体半干旱且湖平面波动频繁、水体盐度降低，导致湖盆边缘带云坪转为藻灰坪、湖盆内以泥云岩变为灰泥沉积为主；芦一段后期（ $P_2L_1^1$ ）气候及古水深变化频繁（图 7-c），盆内形成以灰泥沉积为主、见泥晶白云岩夹薄层白云质粉砂岩的云坪沉积。值得注意的是，吉北斜坡芦草沟组咸化湖泊混合沉积模式与受河流控制的咸化湖盆差异明显。一般而言，湖退阶段沉积物输入受限、化学沉积及微生物广泛发育，湖侵阶段则以陆源碎屑沉积为主（宋光永等，2024）。而吉北斜坡芦草沟组一段的碳酸盐沉积物

在湖侵期间为主，且化学沉积类型具明显的区域性：芦一段早期气候干旱炎热、水体最浅、陆源输入最强，形成陆源碎屑为主的水下分流河道及滩坝沉积。因滩坝围限区水体浅、蒸发作用强，局部水体盐度升高（如蒸发浓缩卤水）有利于以泥—粉晶白云岩为主的云坪沉积（杨志波等，2024）。芦一段后期气候变为温暖、半干旱环境，水体变深、盐度变低及水动力条件减弱导致沉积物由白云质泥岩转变为灰质泥岩（张逊，2020）。

此外，区内芦草沟组沉积相分布受构造控制下的古地貌影响明显。其中，吉北地区扇三角洲受三台断裂及吉木萨尔断裂约束了扇三角洲砂体的发育；湖盆中部发育水下“古隆起”地貌，水动力较强，有利于滩坝亚相沉积；在湖泊沉积期水下高地可间歇性露出湖面，促进灰/云坪发育（朱超等，2022）。因此，古构造及古地貌明显控制了滩坝及灰/云坪的分布范围。此外，区内藻灰坪多发育于扇三角洲沉积周缘混合浅湖区的滩坝范围（图 2-e；图 3-p），其原因可能与高水动能、适宜古地貌及滩坝环境所提供的养分利于蓝细菌生长有关（王建功等，2020），且温暖、半干旱及适宜光照（滩坝上部）亦是微生物发育的有利条件（Dupraz and Strasser, 2002）；而湖盆中部受陆源输入缺乏、湖面整体较深且受气候及火山—热液作用影响明显，形成以泥晶白云岩夹粉晶白云岩为主的云坪沉积（谢再波等，2023）。

综上，区内芦一段沉积相区域性分布受陆源碎屑输入、古地貌、气候及湖平面变化综合控制。北部陆屑输入减少约束了扇三角洲前缘砂体的分布，并由盆缘至湖盆中心逐渐形成陆源碎屑沉积—混合沉积—碳酸盐及细粒沉积的全粒序沉积组合；气候变化不仅影响湖平面变化，也控制了化学沉积类型；强水动力及温暖、半干旱气候是微生物岩发育的关键因素（图 8）。鉴于吉北斜坡东北部及西北部断裂以北钻井较少，古构造活动差异导致斜坡带物源供给及古坡度对近源咸化湖泊盆边缘砂体分布的影响尚待深化。

5 结论

1) 吉木萨尔凹陷北斜坡区二叠系芦草沟组一段由陆源碎屑岩（砾岩、砂岩等）、碳酸盐岩（泥晶白云岩、泥晶灰岩等）及混积岩组成，含少量黏土矿物与火山碎屑组分，岩石类型复杂；属扇三角洲—咸化湖泊沉积，发育扇三角洲前缘、碎屑浅湖及混合浅湖 3 类亚相及水下分流河道、水下分流河道间、碎屑浅湖泥、滩坝、云（灰/藻）坪及混合浅湖泥 6 类微相。

2) 芦草沟组一段总体具湖侵体系下陆源碎屑、灰岩及白云岩沉积的垂向演化序列，早期陆源供给强、扇三角洲发育，后期陆源输入减弱、混合浅湖扩张。平面（自北向南）上呈扇三角洲→碎

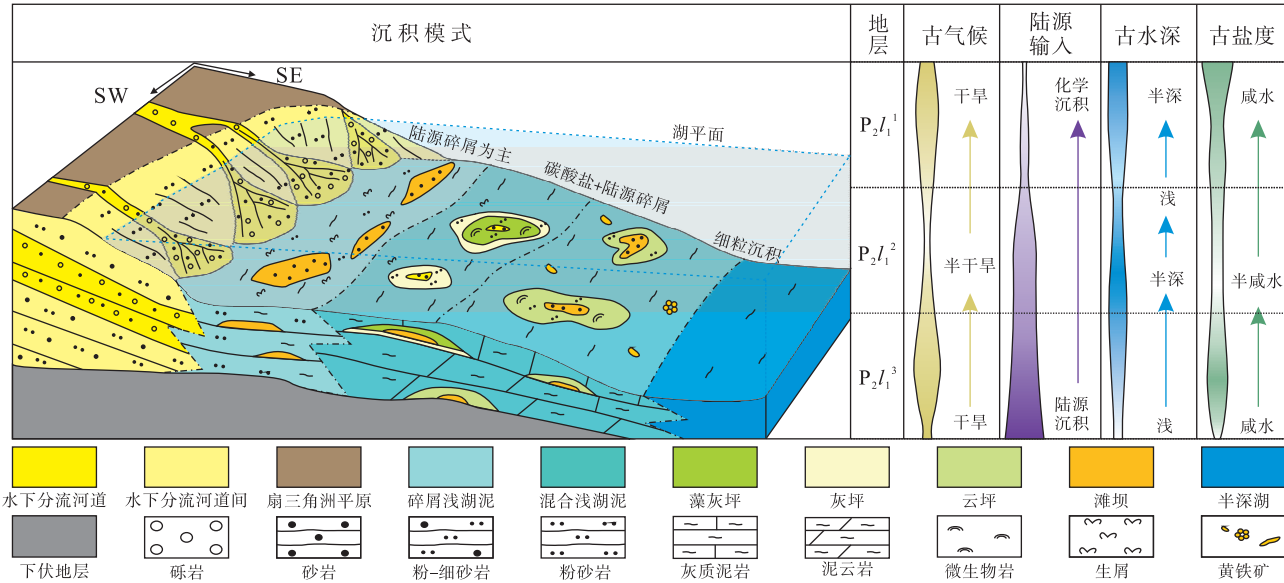


图 8 吉木萨尔凹陷北斜坡区芦草沟组一段沉积模式

Fig. 8 Sedimentary model of the Member 1 of Lucaogou Formation in northern slope of Jimsar sag

屑浅湖→混合浅湖的带状分布,且早期北部扇三角洲与湖盆内滩坝广布,中晚期随湖平面上升,混合浅湖面积扩大、扇三角洲萎缩,盆缘区发育藻灰坪、南部多为云坪与藻云坪沉积。

3) 吉北斜坡区芦一段属古构造、古气候、古地貌、古水深、古盐度及陆源输入共同约束下形成的特殊近源咸化湖盆混合沉积体系。干旱炎热气候形成的咸化环境利于云坪发育,古构造及水下古隆起地貌约束了扇三角洲、滩坝及灰/云坪分布范围,古水深由浅变深、氧化及弱还原环境影响混合浅湖泥的沉积类型,陆源输入强度控制了滩坝分布,强水动力与温暖半干旱气候促进藻灰坪的发育。

参考文献 (References)

- 曹娟,刘小洪,冯明友,张本健,张超,石新,王兴志,祝海华. 2025. 湖相混积砂岩成岩—孔隙演化及致密油意义:以川中龙岗地区侏罗系大安寨段为例. 天然气地球科学,36(2): 322-334. [Cao J, Liu X H, Feng M Y, Zhang B J, Zhang C, Shi X, Wang X Z, Zhu H H. 2025. Diagenesis pore evolution and tight oil significance of lacustrine mixed sandstone: a case study of the Jurassic Da'anzhai section in Longgang area, central Sichuan. *Natural Gas Geoscience*, 36(2): 322-334]
- 陈世悦,张顺,刘惠民,鄢继华. 2017. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨. 古地理学报,19(2): 271-284. [Chen S Y, Zhang S, Liu H M, Yan J H. 2017. Discussion on mixing fine-grained sediments in lacustrine deep water. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 19(2): 271-284]
- 陈旋,苟红光,张有锦,高岗,徐雄飞,林霖,韩猛刚,党文龙,樊柯廷. 2025. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷北部芦草沟组高产页岩油特征及地质意义:以奇探1井为例. 天然气地球科学,36(1): 1-12. [Chen X, Gou H G, Zhang Y J, Gao G, Xu X F, Lin L, Han M G, Dang W L, Fan K T. 2025. Characteristics and geological significance of high-yield shale oil from the Lucaogou Formation in the northern Jimsar sag of Junggar Basin: a case study of Well Qitan 1. *Natural Gas Geoscience*, 36(1): 1-12]
- 邓远,陈轩,覃建华,李映艳,何吉祥,陶鑫,尹太举,高阳. 2024. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组一段沉积期古地貌特征及有利储层分布. 岩性油气藏,36(1): 136-144. [Deng Y, Chen X, Qin J H, Li Y Y, He J X, Tao X, Yin T J, Gao Y. 2024. Paleogeomorphology and favorable reservoir distribution of the First Member of Permian Lucaogou Formation in Jimsar sag. *Lithologic Reservoirs*, 36(1): 136-144]
- 冯明友,岳怀海,刘小洪,张芮,王兴志,祝海华,王委委,李沛珈. 2022. 川中侏罗系致密页岩油储层方解石沉淀模式及油气关系. 中南大学学报(自然科学版),53(9): 3449-3461. [Feng M Y, Yue H H, Liu X H, Zhang R, Wang X Z, Zhu H H, Wang W W, Li P J. 2022. Precipitation model of calcite and relation with hydrocarbon of the Jurassic tight shale oil reservoir in central Sichuan Basin. *Journal of Central South University* (Science and Technology), 53(9): 3449-3461]
- 贾承造. 2017. 论非常规油气对经典石油天然气地质学理论的突破及意义. 石油勘探与开发,44(1): 1-11. [Jia C Z. 2017. Break-through and significance of unconventional oil and gas to classical petroleum geological theory. *Petroleum Exploration and Development*, 44(1): 1-11]
- 匡立春,唐勇,雷德文,常秋生,欧阳敏,侯连华,刘得光. 2012. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力. 石油勘探与开发,39(6): 657-667. [Kuang L C, Tang Y, Lei D W, Chang Q S, Ouyang M, Hou L H, Liu D G. 2012. Formation conditions and exploration potential of tight oil in the Permian saline lacustrine dolomite rocks, Junggar Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 39(6): 657-667]
- 李红斌,王贵文,王松,庞小娇,刘士琛,包萌,彭寿昌,赖锦. 2022. 基于 Kohonen 神经网络的页岩油岩相测井识别方法:以吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例. 沉积学报,40(3): 626-640. [Li H B, Wang G W, Wang S, Pang X J, Liu S C, Bao M, Peng S C, Lai J. 2022. Shale oil lithofacies identification by Kohonen neural network method: the case of the Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(3): 626-640]
- 李攀,肖冬生,师效飞,马强,林潼,杨润泽. 2024. 巨型事件层综述. 古地理学报,26(5): 1271-1286. [Li P, Xiao D S, Shi X F, Ma Q, Lin T, Yang R Z. 2024. A review of megabeds. *Journal of Palaeogeography* (Chinese Edition), 26(5): 1271-1286]
- 李书琴,印森林,高阳,张方,李映艳,彭寿昌. 2020. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相. 天然气地球科学,31(2): 235-249. [Li S Q, Yin S L, Gao Y, Zhang F, Li Y Y, Peng S C. 2020. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimsar sag, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 31(2): 235-249]
- 刘翰林,邹才能,邱振,尹帅,杨智,吴松涛,张国生,陈艳鹏,马锋,李士祥,张岩. 2023. 陆相黑色页岩沉积环境及有机质富集机制:以鄂尔多斯盆地长7段为例. 沉积学报,41(6): 1810-1829. [Liu H L, Zou C N, Qiu Z, Yin S, Yang Z, Wu S T, Zhang G S, Chen Y P, Ma F, Li S X, Zhang Y. 2023. Sedimentary depositional environment and organic matter enrichment mechanism of continental black shale: a case study of the Chang 7 Section in the Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1810-1829]
- 柳波,吕延防,孟元林,李新宁,郭小波,马强,赵万春. 2015. 湖相纹层状细粒岩特征、成因模式及其页岩油意义:以三塘湖盆地马朗凹陷二叠系芦草沟组为例. 石油勘探与开发,42(5): 598-607. [Liu B, Lü Y F, Meng Y L, Li X N, Guo X B, Ma Q, Zhao W C. 2015. Petrologic characteristics and genetic model of lacustrine lamellar fine-grained rock and its significance for shale oil exploration: a case study of Permian Lucaogou Formation in Malang sag, Santanghu Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 42(5): 598-607]
- 罗锦昌,田继军,马静辉,闫嘉启,梁雅菲,胡卓浩. 2022. 吉木萨尔凹陷吉页1井区二叠系芦草沟组沉积环境及有机质富集机理. 岩

- 性油气藏,34(5): 73-85. [Luo J C, Tian J J, Ma J H, Yan J Q, Liang Y F, Hu Z H. 2022. Sedimentary environment and organic matter enrichment mechanism of Permian Lucaogou Formation in Jiye-1 well area, Jimsar sag. *Lithologic Reservoirs*, 34(5): 73-85]
- 曲长胜, 邱隆伟, 杨勇强, 陈程, 汤丽莉, 余宽宏, 万敏. 2017. 吉木萨尔凹陷芦草沟组碳酸盐岩碳氧同位素特征及其古湖泊学意义. *地质学报*, 91(3): 605-616. [Qu C S, Qiu L W, Yang Y Q, Chen C, Tang L L, Yu K H, Wan M. 2017. Carbon and oxygen isotope compositions of carbonatic rock from Permian Lucaogou Formation in the Jimsar sag, NW China and their paleolimnological significance. *Acta Geologica Sinica*, 91(3): 605-616]
- 邵雨, 杨勇强, 万敏, 邱隆伟, 操应长, 杨生超. 2015. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积特征及沉积相演化. *新疆石油地质*, 36(6): 635-641. [Shao Y, Yang Y Q, Wan M, Qiu L W, Cao Y C, Yang S C. 2015. Sedimentary characteristic and facies evolution of Permian Lucaogou Formation in Jimsar sag, Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 36(6): 635-641]
- 宋光永, 刘占国, 王艳清, 龙国徽, 朱超, 李森明, 田明智, 施奇, 夏志远, 宫清顺. 2024. 咸化湖盆混积岩岩相类型、沉积旋回及相模式: 以柴达木盆地风西地区新近系为例. *石油勘探与开发*, 51(6): 1304-1316. [Song G Y, Liu Z G, Wang Y Q, Long G H, Zhu C, Li S M, Tian M Z, Shi Q, Xia Z Y, Gong Q S. 2024. Lithofacies types, sedimentary cycles, and facies models of saline lacustrine hybrid sedimentary rocks: a case study of Neogene in Fengxi area, Qaidam Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 51(6): 1304-1316]
- 谭聪, 袁选俊, 于炳松, 刘策, 李雯, 崔景伟. 2019. 鄂尔多斯盆地南缘上二叠统一中下三叠统地球化学特征及其古气候、古环境指示意义. *现代地质*, 33(3): 615-628. [Tan C, Yuan X J, Yu B S, Liu C, Li W, Cui J W. 2019. Geochemical characteristics and paleoclimatic implications of the Upper Permian and Middle-Lower Triassic strata in Southern Ordos Basin. *Geoscience*, 33(3): 615-628]
- 王欢, 马世忠, 牛东亮, 刘叶, 毕然, 周志国. 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷西区芦草沟组细粒岩元素地球化学特征及古环境意义. *矿物岩石地球化学通报*, 41(1): 143-150. [Wang H, Ma S Z, Niu D L, Liu Y, Bi R, Zhou Z G. 2022. Elemental geochemical characteristics of fine grained sedimentary rocks of the Lucaogou Formation in the western Jimusar sag of the Junggar Basin and their paleoenvironmental significances. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 41(1): 143-150]
- 王剑, 袁波, 刘金, 李勇, 李二庭, 马聪, 张宝真. 2022. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组混积岩成因及其孔隙发育特征. *石油实验地质*, 44(3): 413-424. [Wang J, Yuan B, Liu J, Li Y, Li E T, Ma C, Zhang B Z. 2022. Genesis and pore development characteristics of Permian Lucaogou migmatites, Jimsar sag, Junggar Basin. *Petroleum Geology and Experiment*, 44(3): 413-424]
- 王建功, 张道伟, 白亚东, 孙秀建, 李翔, 王爱萍, 张世铭, 易定红, 杨巍. 2020. 柴西地区上油砂山组咸化湖沼沉积与微生物岩. *地质学报*, 94(11): 3228-3248. [Wang J G, Zhang D W, Bai Y D, Sun X J, Li X, Wang A P, Zhang S M, Yi D H, Yang W. 2020. Saline lacustrine palustrine sediments and microbialite in the upper Youshashan Formation in the western Qaidam Basin. *Acta Geologica Sinica*, 94(11): 3228-3248]
- 王小军, 宋永, 郭旭光, 常秋生, 孔玉华, 郑孟林, 秦志军, 阳孝法. 2023. 陆相咸化湖盆细粒沉积岩分类及其石油地质意义. *沉积学报*, 41(1): 303-317. [Wang X J, Song Y, Guo X G, Chang Q S, Kong Y H, Zheng M L, Qin Z J, Yang X F. 2023. Classification of fine-grained sedimentary rocks in saline lacustrine basins and its petroleum geological significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 303-317]
- 魏巍, 陆永潮, 刘惠民, 张守鹏, 张靖宇, 杜远生. 2021. 古盐度指标与渤海湾盆地古近系海侵事件初探. *沉积学报*, 39(3): 571-592. [Wei W, Lu Y C, Liu H M, Zhang S P, Zhang J Y, Du Y S. 2021. A preliminary study on the paleosalinity indicators and Paleogene transgression events in the Bohai Bay Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 39(3): 571-592]
- 吴宝成, 吴承美, 谭强, 褚艳杰, 梁成钢, 李文波, 张金凤, 陈依伟, 徐田录, 王良哲. 2024. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷昌吉页岩油成藏条件及勘探开发关键技术. *石油学报*, 45(2): 437-460. [Wu B C, Wu C M, Tan Q, Chu Y J, Liang C G, Li W B, Zhang J F, Chen Y W, Xu T L, Wang L Z. 2024. The reservoir-forming conditions and key exploration and development technologies of Changji shale oil in Jimusar Depression, Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 45(2): 437-460]
- 谢再波, 曲永强, 吴涛, 王天海, 刘雨桐, 黑晨露, 陶辉飞. 2023. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积古环境与生物来源探讨. *天然气地球科学*, 34(8): 1328-1342. [Xie Z B, Qu Y Q, Wu T, Wang T H, Liu Y T, Hei C L, Tao H F. 2023. Discussion on the sedimentary paleoenvironment and biological source of Permian Lucaogou Formation in Jimusar sag, Junggar Basin. *Natural Gas Geoscience*, 34(8): 1328-1342]
- 鄢伟, 樊太亮, 张光学, 高志前, 李一凡, 张国庆, 李福元, 孙鸣, 吕瑶瑶. 2023. 塔里木盆地塔中—顺托果勒地区奥陶系鹰山组碳酸盐岩颗粒滩沉积特征. *地学前缘*, 30(4): 76-87. [Yan W, Fan T L, Zhang G X, Gao Z Q, Li Y F, Zhang G Q, Li F Y, Sun M, Lü Y Y. 2023. Sedimentary characteristics of Ordovician carbonate intraclastic shoals of the Yingshan Formation, Tazhong-Shuntuoguole area, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 30(4): 76-87]
- 杨华, 窦伟坦, 刘显阳, 张才利. 2010. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7沉积相分析. *沉积学报*, 28(2): 254-263. [Yang H, Dou W T, Liu X Y, Zhang C L. 2010. Analysis on sedimentary facies of Member 7 in Yanchang Formation of Triassic in Ordos Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(2): 254-263]
- 杨志波, 季汉成, 鲍志东, 史燕青, 赵雅静, 向鹏飞. 2024. 白云石晶体结构和地球化学特征对沉积环境响应: 以扬子地台晚埃迪卡拉纪灯影组白云岩为例. *地学前缘*, 31(3): 68-79. [Yang Z B, Ji H C, Bao Z D, Shi Y Q, Zhao Y J, Xiang P F. 2024. Dolomite crystal structure and geochemical characteristics in response to depositional environment: an example of dolomite from the Late Ediacaran Dengying Formation of the Yangzi Plateau. *Earth Science Frontiers*,

- 31(3): 68-79]
- 殷志强,秦小光,吴金水,宁波. 2008. 湖泊沉积物粒度多组分特征及其成因机制研究. 第四纪研究,28(2): 345-353. [Yin Z Q, Qin X G, Wu J S, Ning B. 2008. Multimodal grain-size distribution characteristics and formation mechanism of lake sediments. Quaternary Sciences,28(2): 345-353]
- 张健,刘楼军,黄芸,王军,胡斌. 2003. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷中—上二叠统沉积相特征. 新疆地质,21(4): 412-414. [Zhang J, Liu L J, Huang Y, Wang J, Hu B. 2003. Sedimentary characteristics of the Middle-Upper Permian in Jimsar sag of Junggar Basin. Xinjiang Geology,21(4): 412-414]
- 张少敏,操应长,朱如凯,葱克来,王健,朱宁,户瑞宁. 2018. 湖相细粒混合沉积岩岩石类型划分: 以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例. 地学前缘,25(4): 198-209. [Zhang S M, Cao Y C, Zhu R K, Xi K L, Wang J, Zhu N, Hu R N. 2018. Lithofacies classification of fine-grained mixed sedimentary rocks in the Permian Lucaogou Formation, Jimsar sag, Junggar Basin. Earth Science Frontiers,25(4): 198-209]
- 张文文,韩长城,田继军,张治恒,张楠,李正强. 2021. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组层序地层划分及演化特征. 岩性油气藏,33(5): 45-58. [Zhang W W, Han C C, Tian J J, Zhang Z H, Zhang N, Li Z Q. 2021. Sequence stratigraphy division and evolutionary features of Permian Lucaogou Formation in Jimsar sag. Lithologic Reservoirs,33(5): 45-58]
- 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岩相学研究. 中国地质大学博士学位论文. [Zhang X. 2020. Research on the sedimentary system types of the Middle-Upper Permian and shale facies of the Lucaogou Formation on the southeastern margin of the Junggar Basin. Doctoral dissertation of China University of Geosciences]
- 郑孟林,田爱军,杨彤远,何文军,陈磊,吴海生,丁靖. 2018. 准噶尔盆地东部地区构造演化与油气聚集. 石油与天然气地质,39(5): 907-917. [Zheng M L, Tian A J, Yang T Y, He W J, Chen L, Wu H S, Ding J. 2018. Structural evolution and hydrocarbon accumulation in the eastern Junggar Basin. Oil & Gas Geology,39(5): 907-917]
- 支东明,李建忠,杨帆,康积伦,张伟,马强,陶林本. 2023. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系全油气系统地质特征与勘探开发实践. 中国石油勘探,28(4): 14-23. [Zhi D M, Li J Z, Yang F, Kang J L, Zhang W, Ma Q, Tao L B. 2023. Geological characteristics and exploration and development practice of the Permian full oil and gas system in Jimsar sag, Junggar Basin. China Petroleum Exploration,28(4): 14-23]
- 支东明,谢安,杨帆,马强,何昌松,苟红光. 2024. 准噶尔盆地东部二叠系富烃凹陷全油气系统勘探前景. 地质力学学报,30(5): 781-794. [Zhi D M, Xie A, Yang F, Ma Q, He C S, Gou H G. 2024. Exploration prospects of the whole oil and gas system in the Permian hydrocarbon depressions in the Eastern Junggar Basin. Geological Mechanics Journal,30(5): 781-794]
- 周杰,孙雨,吴科睿,闫百泉,杨大明,于涛,徐梓轩,白仕鑫. 2025. 陆相湖盆细粒沉积岩有机质富集影响因素与模式研究进展. 地质论评,71(2): 421-438. [Zhou J, Sun Y, Wu K R, Yan B Q, Yang D M, Yu T, Xu Z X, Bai S X. 2025. Influence factors and models of organic matter enrichment in fine-grained sedimentary rocks of lacustrine basin. Geological Review,71(2): 421-438]
- 朱柏宇,印森林,郭海平,唐攀,赵俊威,陈旭,雷章树. 2024. 陆相混合细粒岩沉积微相及其对甜点的控制作用: 以吉木萨尔凹陷芦草沟组为例. 沉积学报,42(3): 839-856. [Zhu B Y, Yin S L, Guo H P, Tang P, Zhao J W, Chen X, Lei Z S. 2024. Continental mixed fine-grained rock sedimentary microfacies and their control effect on sweet spots: a case study of the Lucaogou Formation in the Jimusar Depression. Acta Sedimentologica Sinica,42(3): 839-856]
- 朱超,刘占国,宋光永,龙国徽,宫清顺,赵健,李森明,夏志远,吴颜雄,田明智. 2022. 柴达木盆地英雄岭构造带古近系湖相碳酸盐岩沉积模式、演化与分布. 石油学报,43(11): 1558-1567, 1622. [Zhu C, Liu Z G, Song G Y, Long G H, Gong Q S, Zhao J, Li S M, Xia Z Y, Wu Y X, Tian M Z. 2022. Sedimentary model, evolution and distribution of Paleogene lacustrine carbonate rocks in Yingxiongling structural belt, Qaidam Basin. Acta Petrolei Sinica,43(11): 1558-1567,1622]
- Della Porta G. 2015. Carbonate build-ups in lacustrine, hydrothermal and fluvial settings: comparing depositional geometry, fabric types and geochemical signature. In: bosence D W J, Gibbons K A, Le Heron D P, Morgan W A, Pritchard T, Vining B A (eds). Microbial Carbonates in Space and Time: Implications for Global Exploration and Production. London: Geological Society,17-68.
- Dupraz C, Strasser A. 2002. Nutritional modes in coral-microbialite reefs (Jurassic, Oxfordian, Switzerland): evolution of trophic structure as a response to environmental change. Palaios,17(5): 449-471.
- Hatch J R, Leventhal J S. 1992. Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U. S. A. Chemical Geology,99(1-3): 65-82.
- Lettéron A, Hamon Y, Fournier F, Séranne M, Pellenard P, Joseph P. 2018. Reconstruction of a saline, lacustrine carbonate system (Priabonian, St-Chaptes Basin, SE France): depositional models, paleogeographic and paleoclimatic implications. Sedimentary Geology,367: 20-47.
- Mount J F. 1984. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments. Geology,12(7): 432-435.
- Scholle P A, Spearing D. 1982. Sandstone Depositional Environments (AAPG Memoir 31). Tulsa: American Association of Petroleum Geologists.
- Tribouillard N, Algeo T J, Lyons T, Riboulleau A. 2006. Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. Chemical Geology,232(1-2): 12-32.

(责任编辑 郑秀娟 王绍华)