

准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘二叠系芦草沟组异重流沉积

陈 轩^{1,2}, 陶 鑫^{1,2}, 覃建华³, 许长福³, 李映艳³, 邓 远³, 高 阳⁴, 尹太举^{1,2}

[1. 长江大学 油气资源与勘探技术教育部重点实验室, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 3. 中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院, 新疆 克拉玛依 834000; 4. 中海石油(中国)有限公司 深圳分公司, 广东 深圳 518000]

摘要:准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组储层的沉积成因一直存在争议。基于芦草沟组露头、岩心、测井、地震及分析化验资料,开展沉积学分析。研究表明:①准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组储层岩性为粉-细砂岩及泥质粉砂岩,发育对偶粒序及内部侵蚀面、块状层理及陆源植物碎片,为湖泊异重流成因。②异重流水道亚相主要由块状及交错层理粉-细砂岩组成,单层厚度0.8~2.8 m,平均1.6 m,核磁共振孔隙度6.0%~12.0%,平均9.5%;朵叶体亚相主要由粒序层理、爬升波纹层理粉砂岩组成,单层厚度0.5~1.4 m,平均0.9 m,核磁共振孔隙度3.5%~7.8%,平均5.2%。③水道亚相具有透镜状充填地震反射特征,砂体厚层状加积充填,平面上为条带状或舌状,横向宽度1~3 km;朵叶体亚相具有披覆状地震反射特征,砂体薄层状侧积、前积发育,平面为扇形,长度及宽度均超过10 km。④芦草沟组沉积时期,南部山区频繁发生的洪水异重流携带陆源碎屑及有机质在吉木萨尔凹陷快速沉积,形成了砂岩储层与优质烃源岩,造成了水道-朵叶体砂体与异重流侧缘-深湖烃源岩大面积接触、频繁互层。湖泊异重流沉积模式为吉木萨尔凹陷“粗-细共存、源-储共生”高品质页岩油的成因提供了新的沉积学解释机制。

关键词:水道;朵叶体;异重流;页岩油;芦草沟组;吉木萨尔凹陷;准噶尔盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Hyperpycnal flow deposits of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag and its peripheries, Junggar Basin

CHEN Xuan^{1,2}, TAO Xin^{1,2}, QIN Jianhua³, XU Changfu³, LI Yingyan³, DENG Yuan³, GAO Yang⁴, YIN Taiju^{1,2}

[1. Key Laboratory of Exploration Technologies for Oil and Gas Resources, Ministry of Education, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang 834000, China; 4. Shenzhen Branch of CNOOC (China) Ltd., Shenzhen, Guangdong 518000, China]

Abstract: The sedimentary origin of the Permian Lucaogou Formation reservoirs in the Jimusaer Sag, Junggar Basin has long been a controversial topic. Based on data from outcrop and core observations, logging, and seismic surveys, as well as lab tests of the Lucaogou Formation, we conduct sedimentary analysis, obtaining the following results: (1) The reservoirs of the Permian Lucaogou Formation in the study area are of siltstone/fine-grained sandstone and argillaceous siltstone. They feature well-developed paired graded bedding sequences with internal erosion surfaces, massive bedding, and terrestrial plant fragments, which can be an interpretation of a sedimentary origin of lacustrine hyperpycnal flows; (2) The channel subfacies of hyperpycnal flow deposits consists primarily of massive- and cross-bedding siltstone/fine-grained sandstone, with a single-layer thickness of 0.8~2.8 m, averaging 1.6 m and NMR-derived porosity of 6%~12%, averaging 9.5%. In contrast, the lobe subfacies of hyperpycnal flow deposits predominantly comprises siltstones showing graded bedding and climbing-ripple bedding, with a single-layer thickness of 0.5~1.4 m, averaging 0.9 m and NMR-derived porosity of 3.5%~7.8%, averaging 5.2%; (3) The channel subfacies showing seismic reflections featuring lensoid filling presents a stacking pattern of aggradation with thick laminated accretionary fillings that are in the shape of bands or tongues on the plane, with a lateral width of 1~3 km. In

收稿日期:2023-05-10;修回日期:2023-10-16。

第一作者简介:陈轩(1983—),男,博士、教授,沉积学。E-mail: chenxuanwolf@163.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(4207119);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2019E-26, 2019E-26-07, 2019E-26-08)。

contrast, the lobe subfacies displays draping seismic reflections, the sand bodies of which are of thinly laminated lateral-accretion and progradational bedding in the shape of fan on the plane, with both length and width exceeding 10 km; (4) During the deposition of the Lucaogou Formation, terrigenous clastics and organic matter, carried by frequent flood-induced hyperpycnal flows in the mountainous area of the southern Jimusaer Sag, were rapidly deposited in the sag, forming sandstone reservoirs and high-quality source rocks, and leading to the extensive contact and frequent alternation between the sand bodies of channel and lobe subfacies and the source rocks of hyperpycnal flow deposits of marginal and deep lacustrine facies. Such a sedimentary pattern of lacustrine hyperpycnal flows characterized by the coexistence of coarse- and fine-grained sandstones and paragenetic source rock-reservoir sequences, provides a novel sedimentary interpretation on the origin of high-quality shale oil reservoirs in the Jimusaer Sag.

Key words: channel, lobe, hyperpycnal flow, shale oil, Lucaogou Formation, Jimusaer Sag, Junggar Basin

引用格式:陈轩,陶鑫,覃建华,等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘二叠系芦草沟组异重流沉积[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1530–1545.

DOI:10. 11743/ogg20230615.

CHEN Xuan, TAO Xin, QIN Jianhua, et al. Hyperpycnal flow deposits of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag and its peripheries, Junggar Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1530–1545. DOI: 10. 11743/ogg20230615.

异重流被认为是高浓度的河流注入盆地后,流体沿着盆地底部流动且向前远距离搬运的负浮力流,其流体密度大于水体密度^[1-2]。异重流有底床、悬浮及上浮羽流3种沉积物载荷方式。悬浮载荷为主要输送方式,意味着可以向远端输送比中-细砂岩更细的沉积物,并且沉积物能够经过一段很长的搬运距离^[3-6]。在自然界,湖泊或海洋中超过95%的泥、砂沉积物由河流供给,且其中绝大部分是通过悬浮载荷的方式供给,相对于浊流,河流相关的异重流在自然界中更常见,因为它的形成不需要诸如地震、火山、风暴或海啸等突发因素^[6]。前人在总结异重流的概念与特点基础上,提出了异重流的主要识别特征^[7-13],建立了3大类11小类的岩相识别特征及沉积模式。异重流对深水环境中广泛分布的相对粗粒沙、泥沉积物的形成提供了一种新的沉积机制。

随着异重流沉积模式逐渐被认可,学者们相继在松辽盆地和鄂尔多斯盆地的深水湖泊中报道了异重流沉积^[14-17]。准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组细粒沉积特征是:①明暗相间的不规则纹层泥岩、粉砂质泥岩与暗色水平纹层泥岩共生,且垂向上重复、高频出现;②主力储集砂体发育块状层理、平行及交错层理、粒序层理等沉积构造,且砂体的成份及结构成熟度低,砂体单层厚度薄、分布范围较窄;③大量的陆源植物碎屑及砾屑。前人对芦草沟组储集体的沉积成因认识主要有三角洲前缘、滩坝及水下扇沉积模式^[18-23],这些沉积模式并不能很好地解释上述丰富的沉积现象。此外,在地质研究中储集砂体的横向规模和形态的认识分析,若没有成熟的地质模式指导,会造成勘探开发的失误^[24-26]。基于吉木萨尔凹陷及其周缘露头、岩心、钻井及地震资料,结合异重流沉积模式开展沉积学解

释,分析储集砂体的沉积相构成和空间展布,建立沉积模式,探讨异重流对页岩油甜点形成的控制作用,为芦草沟组页岩油高效开发提供有价值支撑。

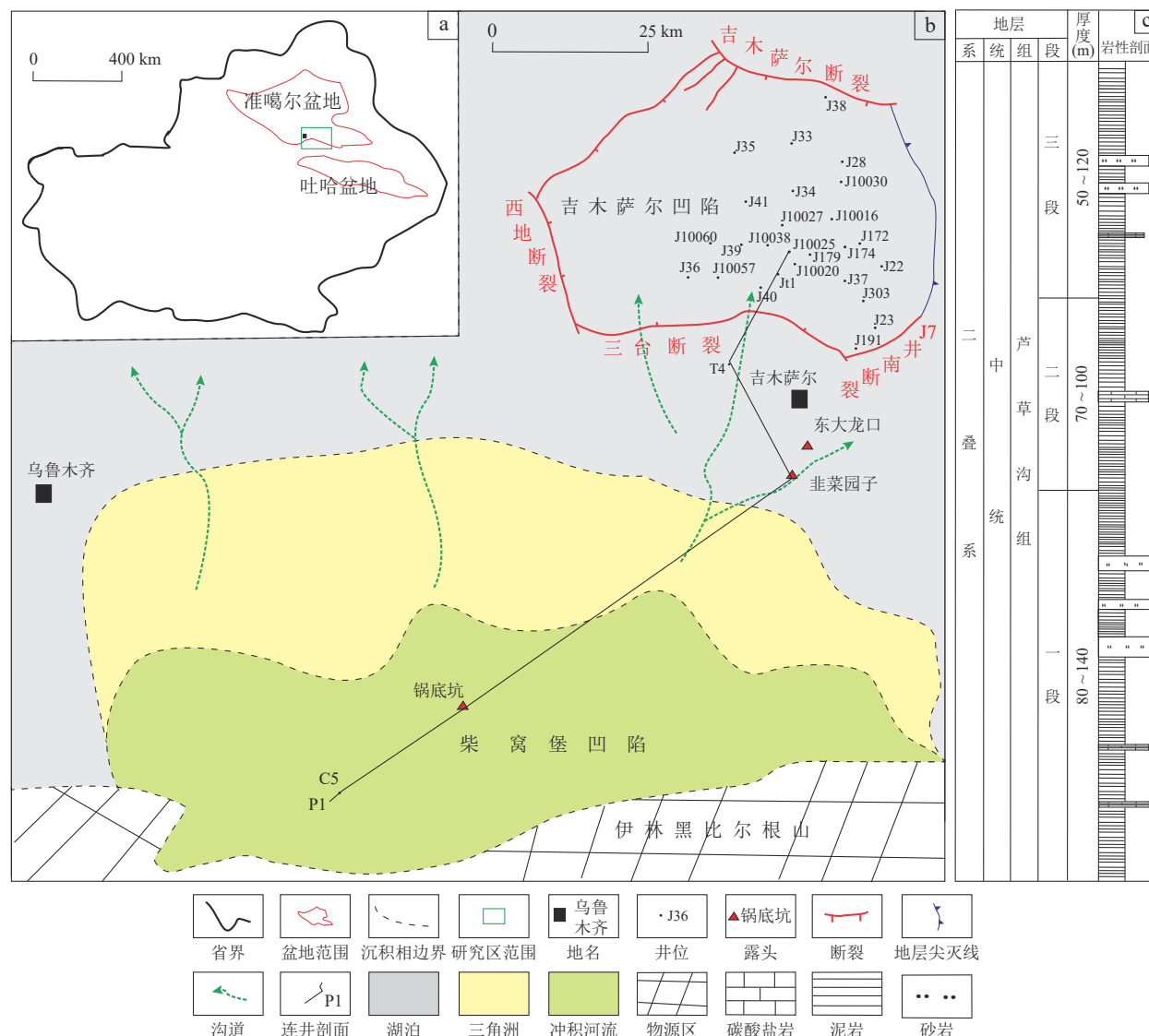
1 地质背景

吉木萨尔凹陷位于准噶尔盆地东南部(图1a),该地区从南至北依次发育伊林黑比尔根山、柴窝堡凹陷、博格达山及吉木萨尔凹陷等构造单元(图1b)。吉木萨尔凹陷被断裂及凸起所环绕,整体为西断东超的箕状凹陷。二叠纪芦草沟组沉积时期,芦草沟组整体岩性为深灰色泥页岩夹薄层砂岩及碳酸盐岩,为咸化湖沉积环境,表现为源-储一体与源-储互层的烃-储配置关系^[20-23]。芦草沟组垂向上整体含油,根据含油差异可划分为3个段,一段对应“下甜点”含油段,三段对应“上甜点含油段”(图1c)。

2 吉木萨尔凹陷及周缘异重流发育的沉积学证据

2.1 吉木萨尔凹陷内岩心的岩石学证据

异重流对应的沉积物称为异重岩。季节性的洪水河流携带高浓度沉积物在湖泊中沉积形成异重岩。典型的异重流沉积或异重岩的沉积特征主要为^[8,11]:①对偶出现的反粒序-正粒序沉积组合,并在内部发育微小侵蚀面;②发育具有陆源属性的沉积结构,如植物碎片和煤块等;③从源到汇,发生砾岩、砂岩和泥质岩的分异,并发育丰富的流水相关的沉积构造。

图1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘地质背景^[21]Fig. 1 Map showing the geological setting of the Jimusaer Sag and its peripheries, Junggar Basin^[21]

a. 研究区位置; b. 研究区构造格局及沉积相展布; c. 芦草沟组地层划分

一系列向上变粗和向上变细的沉积单元成对出现,反映出洪水从增加到衰退的沉积过程。洪峰期形成的层内微侵蚀面可以把粒序和层理分割,也可以侵蚀下部沉积单元。在吉木萨尔凹陷内J10025井“上甜点段”的岩心上,发育了多个反粒序-正粒序的泥质粉砂岩及粉-细砂岩沉积序列,两组粒序之间见不规则微侵蚀面,反粒序厚度相对较薄(图2a)。与之对应的岩石薄片中也具有对应的粒序组合特征(图2b)。正粒序-反粒序之间沉积物粒度细、泥质含量,反粒序-正粒序之间颗粒粒度大、成熟度低,见大量不规则有机质层状分布。粒序层理构造且成熟度低(图2c—e),进一步验证了洪水异重流能量的变化及沉积物快速堆积的特点。此外,在岩心上见单一的正粒序沉积单元,底部见不规则侵蚀面及微小砾屑定向排列构成的交错层

理(图2f),反映出洪水能量较强且对下伏沉积单元进行侵蚀;异重岩中见植物化石、煤块或其他能反映陆源属性的沉积物。在吉木萨尔凹陷的岩心中见植物化石碎片(图2g),薄片见大量不规则的微小有机质碎片(图2c,e),可以验证沉积物具有陆源的属性;异重岩中发育块状、爬升波纹层和水平纹层对应异重流流体水动力逐渐减弱(2h—g)。

2.2 吉木萨尔凹陷南部露头区的岩石学证据

在吉木萨尔凹陷南部山区,芦草沟组在多个露头点出露。吉木萨尔县城南部的东大龙口剖面,见暗色泥岩与灰色中层砂岩的互层沉积,砂岩中发育交错层理及平行层理、见砾屑结构,理解为较强流水作用的沉积产物(图3a)。此外,发育反粒序与正粒序的粉-细

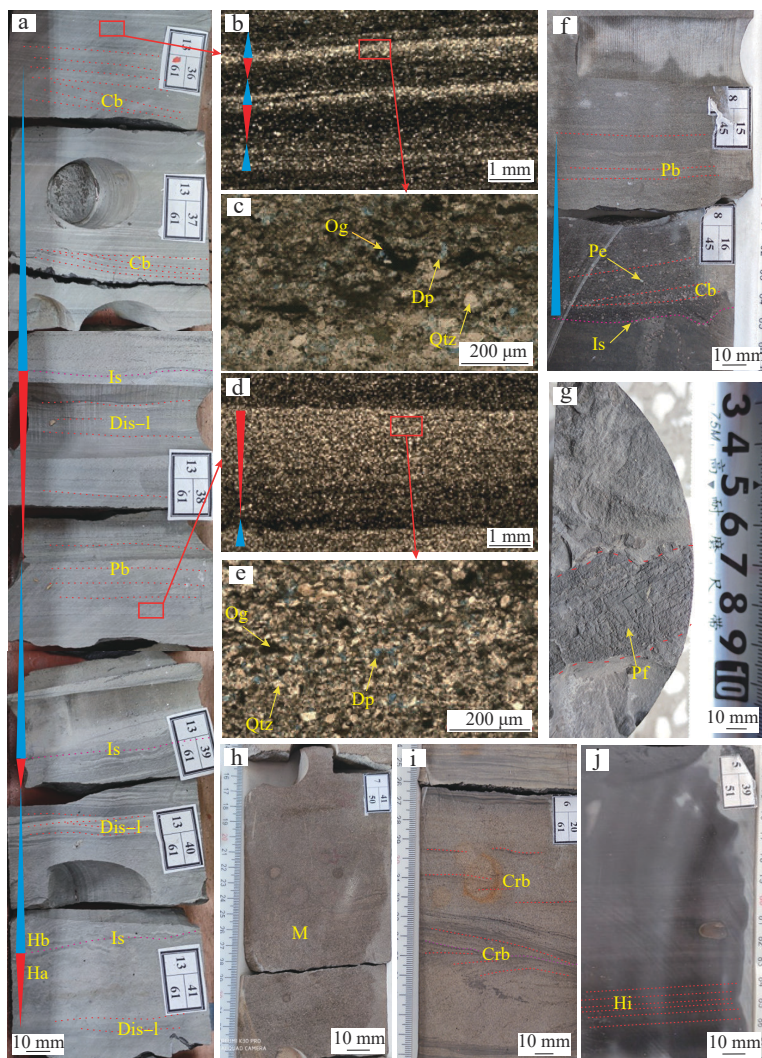


图2 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组岩石学特征显微照片

Fig. 2 Petrological characteristic images of cores and thin sections of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin
a. 岩心, 灰色粉-细砂岩与泥质粉砂岩互层, 见对偶正粒序(Hb)及反粒序(Ha), 内部发育微侵蚀面(Is), 见平行层理(Pb)、交错层理(Cb)及不规则层理(Dis-l), J10025井, 埋深3 533.2~3 533.6 m; b. 镜下薄片, 纹层泥质粉砂岩, 对偶粒序, J10025井, 埋深3 533.2 m; c. 镜下薄片, 粉砂岩, 石英(Qtz)约55%, 见溶蚀孔(Dp)及不规则有机质(Og); d. 镜下薄片, 泥质粉砂岩, 见对偶粒序层理, J10025井, 埋深3 533.4 m; e. 镜下薄片, 粉砂岩, 石英(Qtz)约70%, 见溶蚀孔(Dp)及不规则有机质(Og); f. 岩心, 细砂岩, 底部侵蚀面(Is), 见交错层理(Cb)及平行层理(Pb), 长英质砾屑结构(Pe), 整体正粒序, J174井, 埋深3 147.9 m; g. 岩心, 灰色泥质粉砂岩, 见植物碎片(Pf), J174井, 埋深3 116.8 m; h. 岩心, 褐灰色粉砂岩, 块状构造(M), J10025井, 埋深3 556.0 m; i. 岩心, 灰色粉-细砂岩, 爬升波纹层理(Crb), J174井, 埋深3 539.6 m; j. 岩心, 深灰色泥岩, 水平层理(Hi), J174井, 埋深3 300.6 m

砂岩, 并发育多个微侵蚀面, 砂岩与暗色泥质岩互层(图3b), 反映出洪水异重流能量的频繁变化。在大龙口剖面南部的韭菜园子剖面中, 见厚层的交错层理砂岩(图3c)及含砾砂岩的组合, 反映出更强水动力作用的沉积特征。在远离吉木萨尔凹陷的柴窝堡凹陷中, 锅底坑剖面及C5井均发育厚层杂色砂、砾岩沉积(图3d), 解释为冲积扇成因。

2.3 源-汇沉积对比

虽然准噶尔盆地二叠纪芦草沟组沉积时期原型盆地类型存在争议^[27], 但吉木萨尔凹陷区芦草沟组整体

发育暗色泥页岩且厚度分布稳定, 为稳定的湖泊环境, 碎屑沉积物主要源自于南部伊林黑比尔根山, 有关这一沉积背景已经达成共识^[20-23]。在伊林黑比尔根山北部山前的柴窝堡凹陷及露头区, C5井岩心及锅底坑露头剖面揭示冲积成因砾岩沉积^[20], 博格达山北部韭菜园子露头剖面中见粗粒深水水道沉积^[18], 东大龙口剖面及吉木萨尔凹陷内发育对偶粒序粉-细砂岩组合(图3b, 图2)。由此, 构建从南部物源区到吉木萨尔凹陷区的沉积对比剖面(图4), 发现碎屑岩岩性向北逐渐变细, 空间上可以解释为冲积河流-三角洲-湖泊异重流的沉积体系。因此综合吉木萨尔凹陷内岩心证据

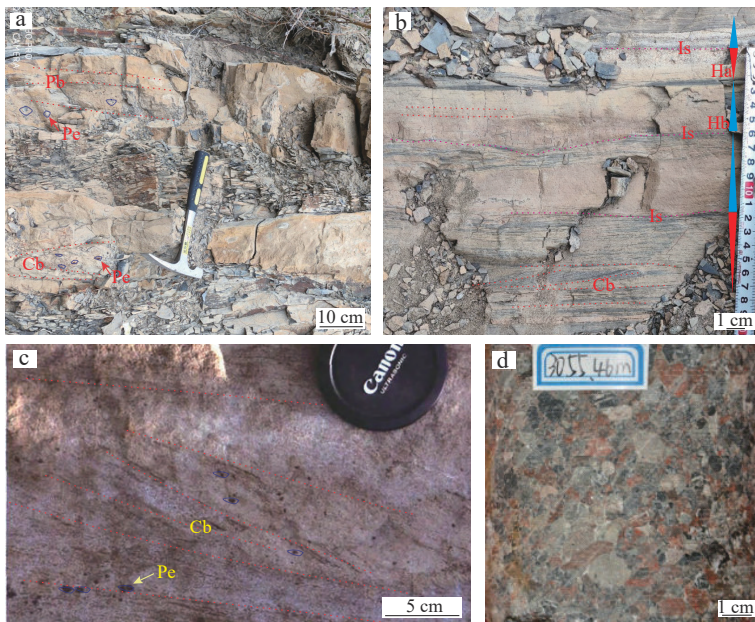


图3 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷南部露头区芦苇沟组岩石学特征照片

Fig. 3 Petrological characteristic images of the Lucaogou Formation in the outcrop south of Jimusaer Sag, Junggar Basin

a. 灰色中层粉-细砂岩与暗色泥岩互层,砂岩中见砾石(Pe)及交错层理(Cb)、平行层理(Pb),东大龙口剖面;b. 反粒序(Ha)-正粒序(Hb)粉-细砂岩及泥质粉砂岩组合,见侵蚀面(Is),交错层理(Cb),东大龙口剖面;c. 交错层理中-粗砂岩(Cb),见砾屑(Pe)结构,韭菜园子剖面(参考文献[18]); d. 杂色砾岩,砾石成分复杂、次棱角状、分选较差,颗粒支撑,C5井(参考文献[20])

和露头区岩石学证据,吉木萨尔凹陷及周缘区广泛发育的暗色泥岩夹薄层粉-细砂岩解释为湖泊异重流沉积,在证据及逻辑上存在合理性。

3 芦苇沟组异重流岩相、沉积亚相及微相

3.1 岩相

基于沉积学原理,开展颜色、岩性、沉积构造及沉积结构等方面的沉积学描述,在芦苇沟组识别出7类岩相。①灰色交错层理含砾砂岩相(图2f,图3a),该岩相岩性成分复杂,整体为中-细砂岩,含较粗粒的砾屑结构(Pe),见交错层理(Cb)和平行层理(Pb)。②褐灰色块状层理细砂岩相(图2h),颜色为褐灰色(含油),整体为均质的块状特征(M),无明显的层理构造,层厚一般大于10 cm(图3b)。③灰色对偶粒序层理粉-细砂岩相(图2a,图3b),颜色以灰色为主,主要由粉砂岩及泥质粉砂岩构成,反粒序及正粒序的组合(Ha-Hb),反粒序与正粒序之间的转换面为不规则的侵蚀面(Is)。④灰色小型交错/平行层理粉-细砂岩相(图3b),岩性主要为粉-细砂岩,垂向上见厘米级别的交错层理(Cb)。⑤灰色爬升波纹层理粉-细砂岩相(图2i),岩性主要为粉砂岩及细砂岩组合,发育向一侧或多侧迁移的爬升波纹(Crb),层理厚度1~2 cm。层理内部由多个毫米级粒序层理和

侵蚀面组成。⑥灰色不规则纹层粉砂质泥岩相(图2a),岩性为毫米级泥与粉砂互层,纹层为不规则波状、连续性差。⑦水平纹层泥岩相(图2j),深灰色泥岩,见多个水平纹层,纹层为毫米级别。

交错层理含砾砂岩相,反映强水动力条件下的底床载荷作用,可以解释为异重流水道沉积^[8,11]。块状层理砂岩,可以解释为异重流水道了较粗粒砂岩的快速堆积。对偶粒序层理粉-细砂岩相,解释为洪水能量的频繁强弱变化^[8,11]。小型交错层理、爬升波纹层理及不规则纹层粉砂岩及泥质粉砂岩相,反映了较强水动力条件下悬浮载荷作用,解释为异重流的侧缘或前缘垛叶体沉积^[8,11]。水平纹层泥岩,解释为静水条件下的缓慢沉降。

3.2 沉积亚相与微相

结合 Zavala 等异重流岩相模式^[8],根据岩相及其组合特征,在吉木萨尔凹陷芦苇沟组中识别出水道(Chl)、天然堤(Le)、朵叶体(Lob)、湖泥(La)及侧缘(Mar)5种微相类型,进而总结出水道、朵叶体和半深湖-深湖3类主要亚相。

3.2.1 水道微相

在异重流近端水流能量强,侵蚀作用明显,形成沟道,其内部主要为交错层理砾岩及砾质砂岩沉积物。底

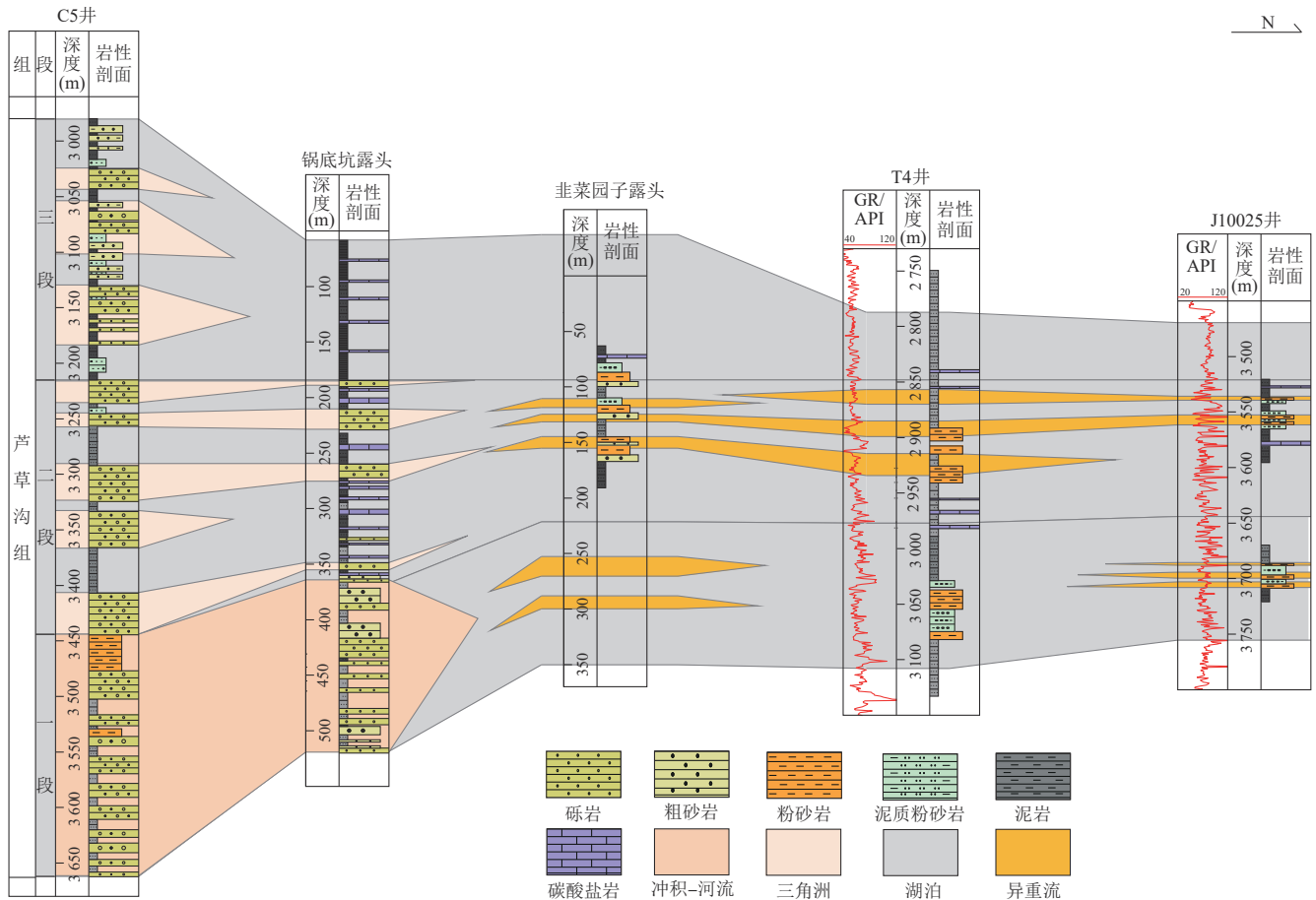


图4 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘区芦草沟组南北向沉积相对比(剖面位置见图1b中P1)

Fig. 4 S-N sedimentary facies correlation of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag and its peripheries, Junggar Basin
(see Fig. 1b-P1 for the section location)

部为侵蚀面构造,向上多发育块状层理、交错层理及平行层理等沉积构造,整体表现出正粒序特征(图4a)。砾石结构、交错层理为底床载荷机制,向上渐变为悬浮载荷机制。吉木萨尔凹陷内沉积物主要来源于凹陷南部且远离物源区,在凹陷南部的露头区有砾岩的报道^[20-21]。凹陷内部芦草沟组岩心中很少见到砾岩,因此可以把吉木萨尔凹陷区的水道解释为远端水道。

3.2.2 天然堤微相

天然堤位于水道两侧,也可以称作漫溢沉积。异重流溢出水道,以悬浮及羽流载荷形式携带相对细粒的沉积物,在水道两侧形成爬升波纹层理粉砂岩及不规则纹层泥质粉砂岩-粉砂岩。沉积物由水道向两侧粒度减小,泥质含量增加。

3.2.3 朵叶体微相

朵叶体在水道沉积末端,由于没有沟道约束,沉积物以悬浮和羽流载荷的形式向四周扩散,形成朵叶体沉积(图4b)。其主要岩相为对偶粒序层理粉砂岩

(图3c,图4b)、爬升波纹层理粉砂岩及泥质粉砂岩(图3d,图4b)等。频繁出现的对偶粒序层理及其内部小型侵蚀面,反映河流能量频繁变化,正粒序反映沉积能量的逐渐减弱,反粒序反映沉积能量的逐渐增强,小型侵蚀面代表异重流沉积期次的转化,这是异重流典型的沉积学特征之一。朵叶体与天然堤沉积序列相似,均为悬浮和羽流机制作用的产物。两者主要差异在平面规模,朵叶体由于没有沟道的限制,平面规模要更大。

3.2.4 侧缘微相

侧缘指的是水道外缘和朵叶体外缘,主要为羽流载荷沉积机制,沉积物以泥质为主,常发育不规则纹层或植物碎片(图3e,f)。侧缘相与湖泊泥岩相的区别主要在沉积构造,湖泊泥岩相(La)一般发育水平纹层,侧缘相主要发育不规则纹层(图4b—f)。侧缘相分布范围广,多与水平纹层湖泊泥岩薄互层叠置共生。

基于异重流沉积学观点,开展岩心描述与分析,总结吉木萨尔凹陷芦草沟组异重流岩相、微相及亚相的沉积特征(表1)。水道亚相,由水道微相、天然堤微相

及侧缘微相叠置构成,主要岩性为粉-细砂岩及泥质粉砂岩,垂向上依次发育侵蚀面构造、块状构造、平行/交错层理、爬升波纹层理及不规则纹层构造,单层厚度一般大于1 m,整体表现出正粒序特征(图5a);朵叶体

表1 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组湖泊和异重流岩相、微相及亚相的构成

Table 1 Compositions of the lithofacies, microfacies, and subfacies of lacustrine and hyperpycnal flow deposits in the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin

相	亚相	微相	岩相
异重流	水道	远端水道	交错层理含砾砂岩、块状层理砂岩
		水下天然堤	对偶粒序层理粉-细砂岩、爬升波纹层理粉-细砂岩、小型交错层理泥质粉砂岩
		侧缘	不规则纹层粉砂质泥岩
	朵叶体	朵叶体	对偶粒序层理粉-细砂岩、爬升波纹层理粉-细砂岩、小型交错层理泥质粉砂岩
		侧缘	不规则纹层粉砂质泥岩
湖泊	半深湖-深湖	湖泥	深灰色-灰色水平纹层泥岩

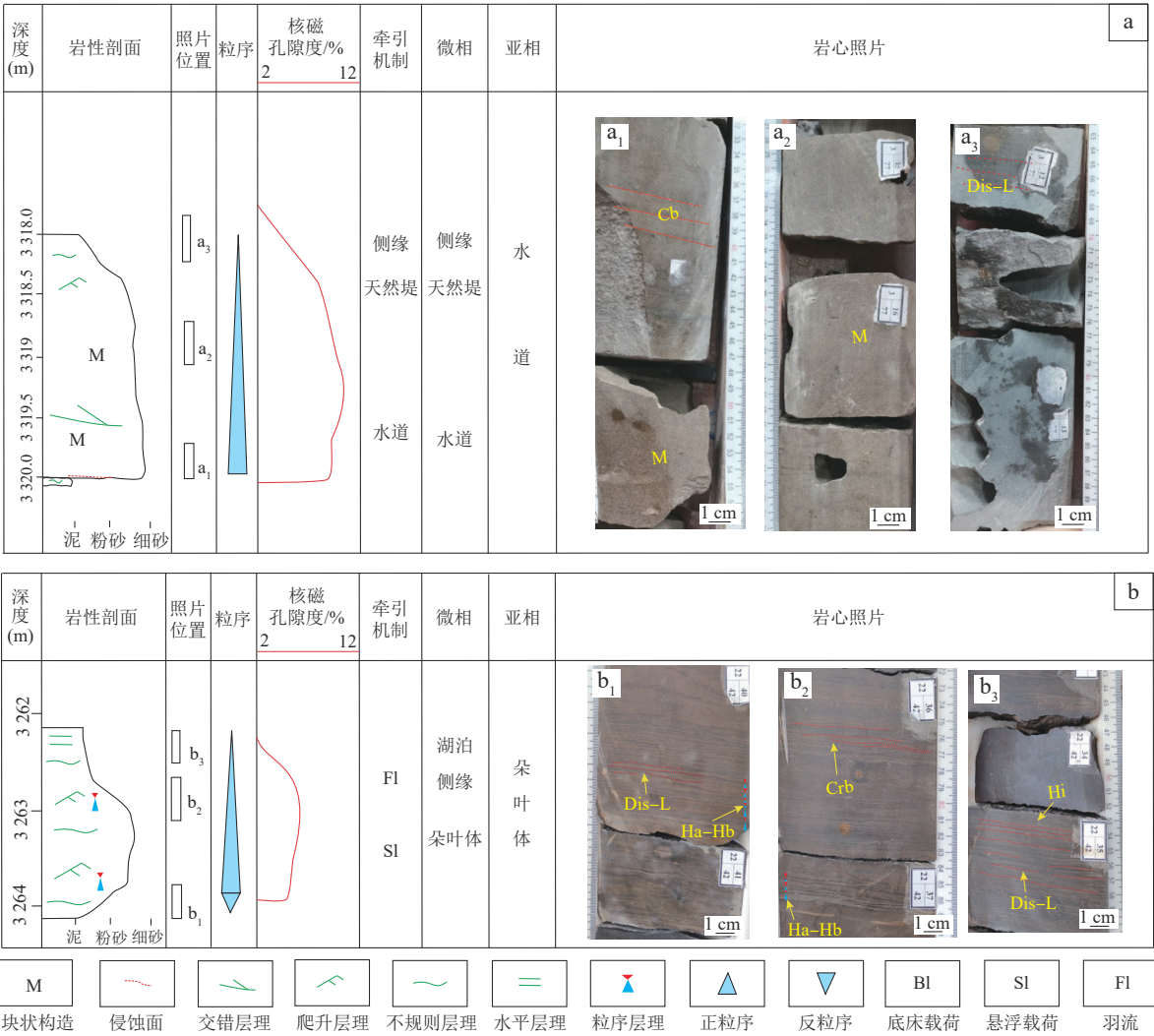


图5 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组异重流水道亚相和朵叶体亚相沉积组合特征

Fig. 5 Combined characteristics of hyperpycnal flow deposits of channel and lobe subfacies in the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin

a₁. 岩心,中-细砂岩,块状层理(M),交错层理(Cb),J10016井;a₂. 岩心,中-细砂岩,块状层理(M),J10016井,m;a₃. 岩心,灰色泥岩-泥质粉砂岩,不规则纹层(Dis-L),J10016井;b₁. 岩心,泥质粉砂岩-粉砂岩,不规则纹层(Dis-L),对偶粒序层理(Ha-Hb),J174井;b₂. 岩心,泥质粉砂岩,爬升波纹层理(Crb),对偶粒序层理(Ha-Hb),J174井;b₃. 岩心,灰色泥岩,水平纹层(Hi),不规则纹层(Dis-L),J174井

亚相,由朵叶体微相、侧缘微相构成,主要岩性为粉砂岩、泥质粉砂岩及粉砂质泥岩,垂向上发育对偶粒序层理、爬升波纹层理及不规则纹层,单层厚度相对较小,整体表现出反粒序-正粒序的组合(图5b)。

4 吉木萨尔凹陷芦草沟组异重流空间发育特征

4.1 取心井沉积对比

构建近南北方向上4口取心井的对比剖面,开展等时地层对比,结合岩心沉积亚相识别、核磁孔隙度(35 ms)测井解释结果及测井曲线的相似性分析,揭示异重流空间形态(图6):①异重流水道以粉-细砂岩为主,主要发育块状层理和交错层理;异重流朵叶体为粉砂岩及泥质粉砂岩,主要发育对偶粒序层理、爬升波纹层理和不规则纹层。两类亚相在自然伽马、电阻率、声

波、密度及中子测井曲线上没有明显的测井相响应规律,核磁孔隙度(35 ms)能够较好的反映沉积体的物性。统计8口取心井亚相、储层厚度及核磁孔隙度的发育特征(图7),可以看出:①水道亚相单层厚度1.3~3.8 m,平均2.2 m;核磁孔隙度6.0%~12.3%,平均9.0%。朵叶体亚相单层厚度0.5~1.4 m,平均0.9 m;核磁孔隙度3.5%~7.8%,平均5.2%。②水道亚相砂体单层厚度较大,横向形态为厚层楔状。朵叶体亚相砂体厚度较小,为板状及薄层状。从水道亚相到朵叶体亚相,单一砂体厚度逐渐减薄。

4.2 井-震结合沉积对比

基于异重流沉积特征及南部沉积物源方向的认知^[20-23],建立井-震结合对比剖面,开展沉积学解剖,揭示异重流空间发育特征及规律。

在垂直水道亚相走向的方向上,地震底界面凹凸不平,具有明显的弱振幅充填地震相反射。钻井剖面

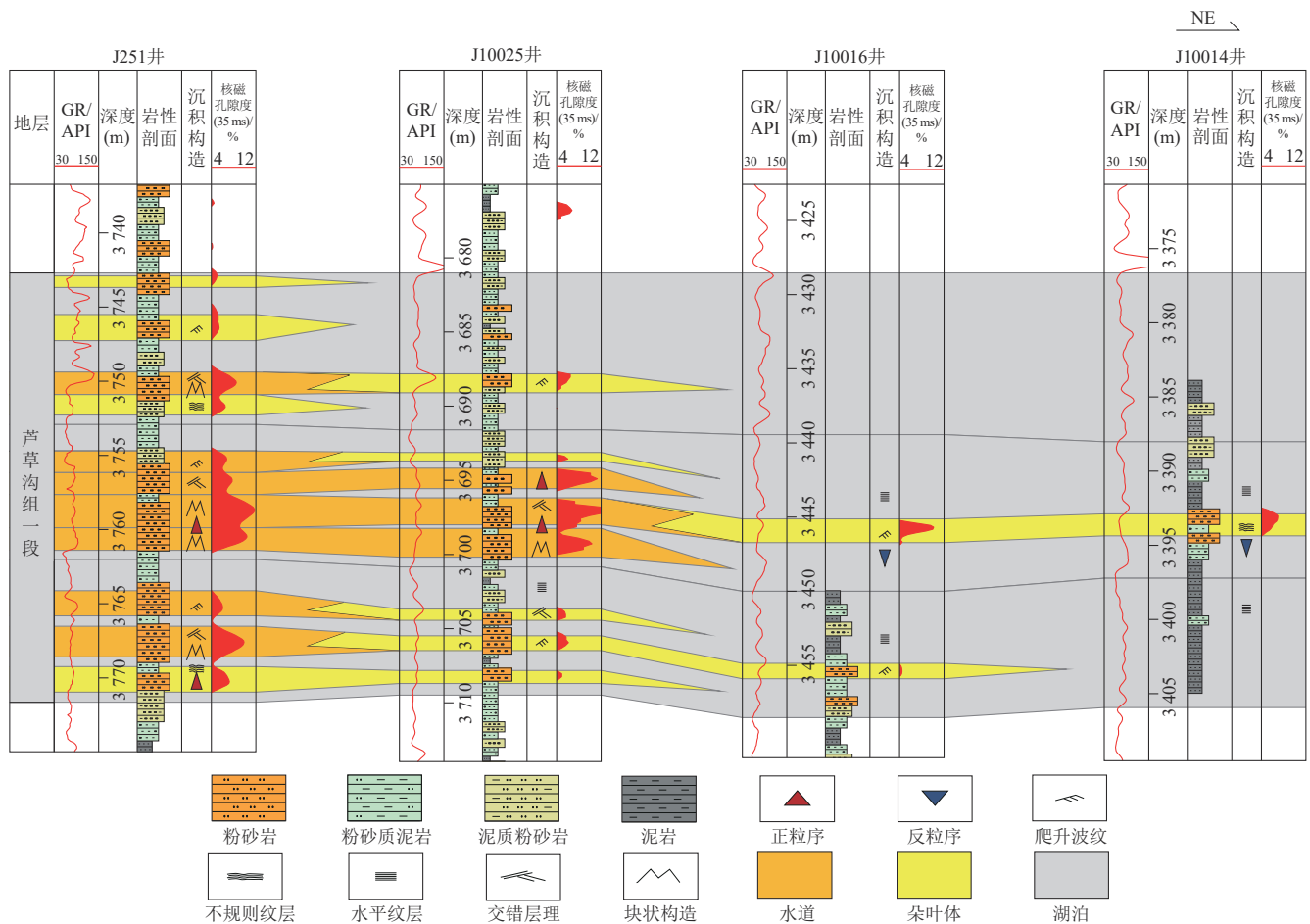


图6 准噶尔盆地芦草沟组一段取心井沉积亚相沉积对比(剖面位置见图11中L1)

Fig. 6 Correlation of sedimentary subfacies in cored wells for the 1st member of the Lucaogou Formation, Junggar Basin (see Fig. 11-L1 for the section location)

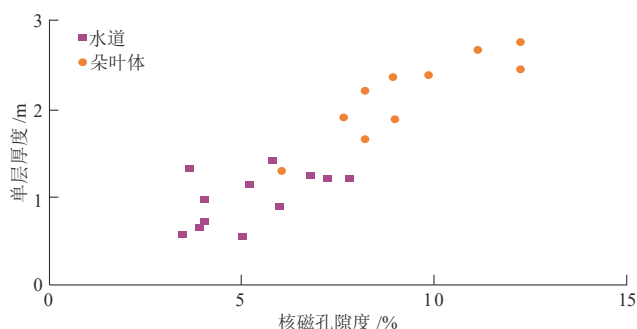


图7 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组水道及朵叶体亚相
单层厚度与核磁孔隙度交汇图

Fig. 7 The single-layer thickness vs. NMR-derived porosity cross plots of the channel and lobe subfacies in the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin

上水道亚相单层厚度大、多层叠置,表现出垂向加积叠置的厚层充填状(图8)。在垂直朵叶体亚相走向的方向上,地震底界面平直,侵蚀作用弱,见好连续披覆地震相反射。钻井剖面上朵叶体单层厚度较小、多层叠置,表现出侧积叠置的薄层席状(图9)。两个方向的横切剖面对比可以进一步看出,水道亚相对下伏地层有明显的侵蚀作用,横向范围局限,而朵叶体亚相对下伏地层的侵蚀作用较弱(尤其在J10016—J43井区为披覆-好连续平行地震相),横向范围分布范围较大(图8,图9)。在平行水道及朵叶体走向的方向上,见两期强振幅到弱振幅变化的地震反射,宏观上具有一定的弱前积反射特征,到北部变化为好连续平行地震反射。南部强振幅到弱振幅变化的地震反射解释为水

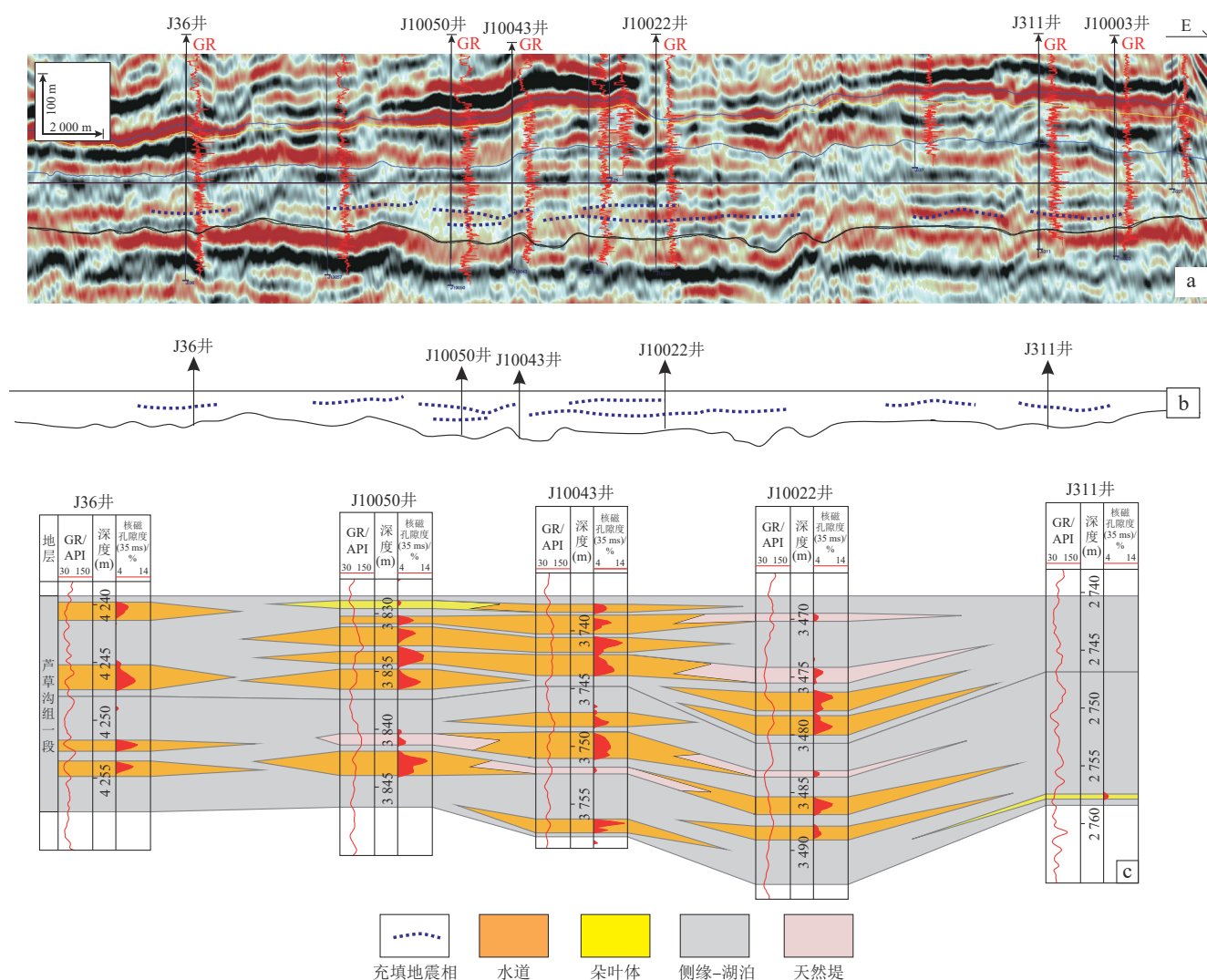


图8 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组一段J36井—J10003井井-震结合异重流沉积对比(剖面位置见图11中L2)

Fig. 8 Seismic-well tie correlation of hyperpycnal flow deposits crossing well J36 to well J10003 in the 1st member of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin (see Fig. 11-L2 for the section location)

a. 地震剖面,见前积充填地震相及平行地震相;b. 地震剖面示意图;c. 连井剖面,砂体呈前积趋势,部分砂体水平分布

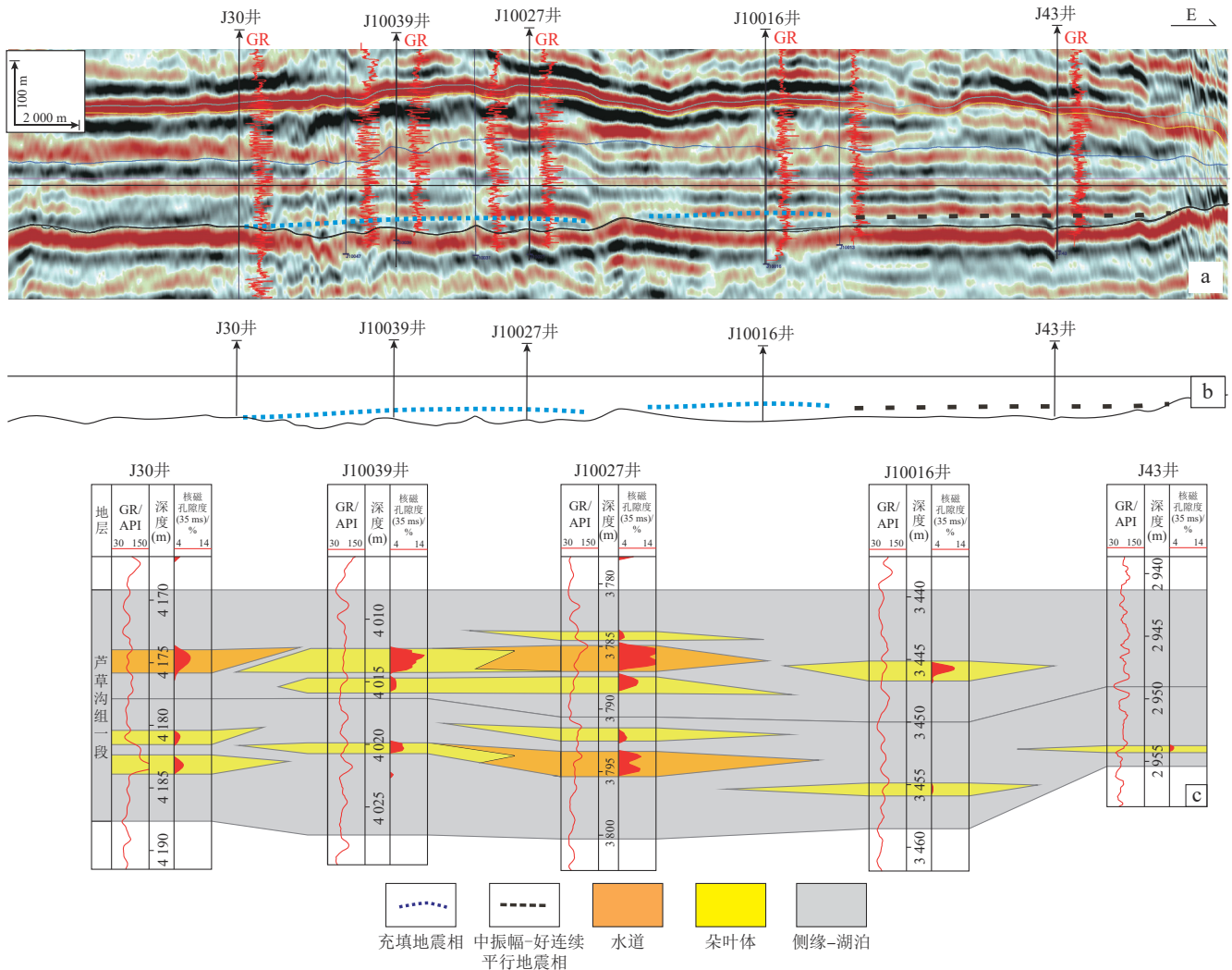


图9 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组一段J30井—J43井井-震结合异重流沉积对比(剖面位置见图11中L3)

Fig. 9 Seismic-well tie correlation of hyperpycnal flow deposits crossing well J30 to well J43 in the 1st member of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin (see Fig. 11-L3 for the section location)

a. 地震剖面, 见前积充填地震相及平行地震相; b. 地震剖面示意图; c. 连井剖面, 砂体呈前积趋势, 部分砂体水平分布

道沉积(横向上地震相为充填反射), 北部强振幅到弱振幅变化的地震反射解释为朵叶体沉积(横向上地震相为披覆反射), 好连续平行地震反射解释为深湖沉积(图10)。该分析进一步验证异重流自南向北进积、侧积, 从水道到朵叶体, 沉积水动力条件逐渐变弱, 储层厚度逐渐变小、宽度逐渐变大。

4.3 芦草沟组异重流沉积平面分布及沉积模式

Zavala 总结的模式中, 基于载荷方式的差异将异重流分为3大类岩相单元: ①B相, 为底床载荷岩相, 主要在能量较强的水道沉积区发育; ②S相, 为悬浮载荷岩相, 主要在水道侧缘及朵叶体沉积区发育; ③L相, 为上浮羽流载荷岩相, 分布范围广, 往往以薄层泥质的形式覆盖在水道、朵叶体及湖泊泥之上。在此基础上,

学者们在异重流中识别出了水道、朵叶体、天然堤及侧缘等微相单元^[14,16,23]。

以单井沉积学分析及砂体平面厚度变化为基础, 构建多条井-震结合沉积对比剖面(图8—图10), 总结异重流不同相带的地震响应特征及发育规律, 综合编制芦草沟组一段沉积相平面图(图11)。吉木萨尔凹陷芦草沟组一段沉积期, 在南部发育3个异重流供水道区, 异重流水道向北推进, 主水流线分散成多支。在水道区, 多期水道垂向及侧向叠置, 平面上为条带状及舌状的分布特征, 宽度1~3 km。水道两侧依次发育天然堤和侧缘体微相。水道末端, 由于没有下切水道的约束, 沉积物以悬浮和羽流载荷的形式向四周扩散, 形成朵叶体沉积, 朵叶体为扇形, 长度及宽度平面规模超过10 km(图11)。

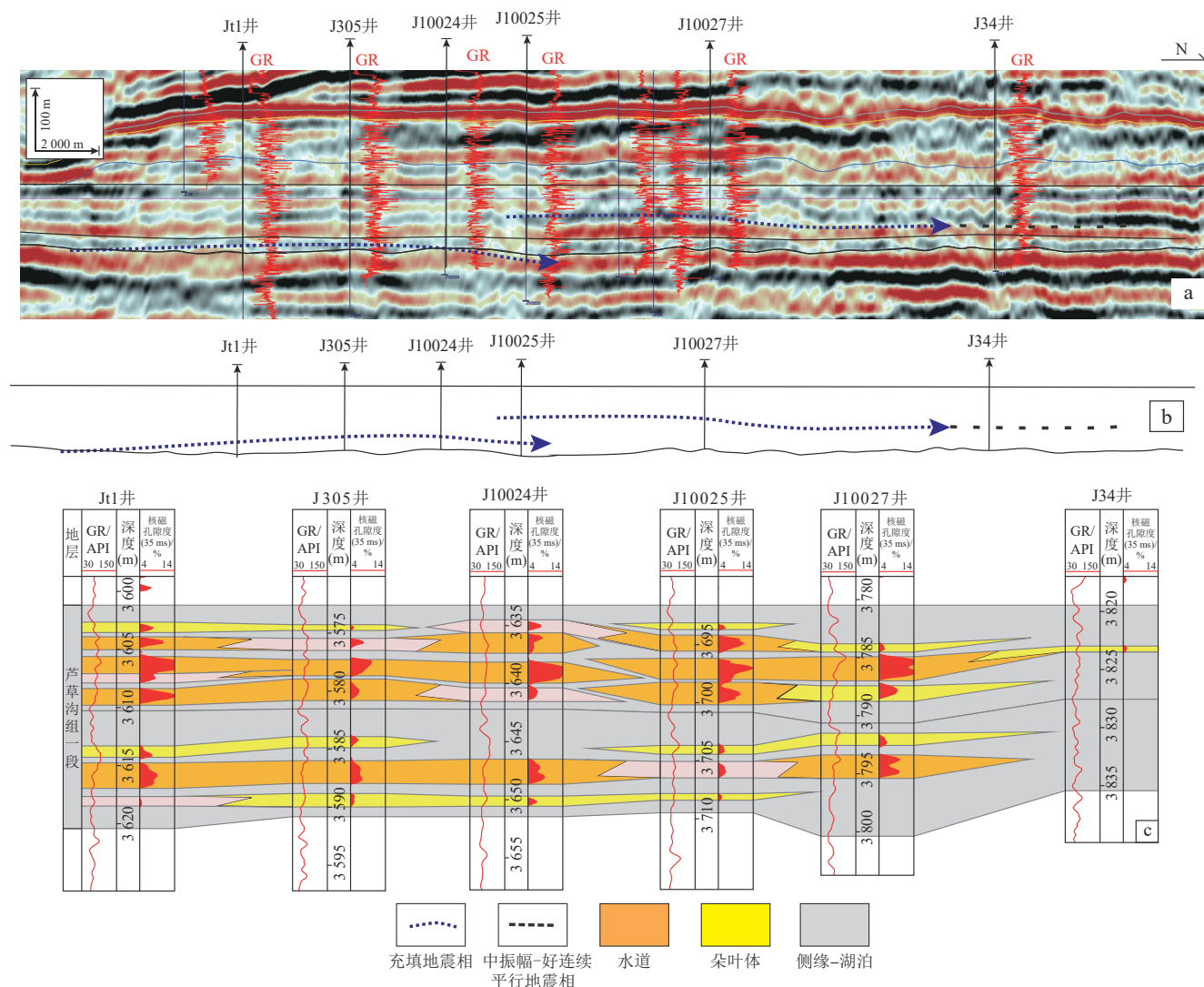


图10 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组一段Jt1井—J34井—震结合异重流沉积对比(剖面位置见图11中L4)

Fig. 10 Seismic-well tie correlation of hyperpycnal flow deposits crossing well Jt1 to well J34 in the 1st member of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin (see Fig. 11-L4 for the section location)

a. 地震剖面, 见前积充填地震相; b. 地震剖面示意图; c. 连井剖面, 砂体呈前积趋势

结合吉木萨尔凹陷内取心井的微相-亚相组合特征、取心井沉积对比、井-震结合沉积对比及平面分布特征的分析, 建立吉木萨尔凹陷异重流沉积模式(图12)。

在水道发育区, 以底床载荷-悬浮载荷为主, 在较强的侵蚀作用下形成下凹的水道, 沉积形成厚层水道砂体, 多具有侵蚀面、块状层理和交错层理等沉积构造(图12a, b), 砂体在剖面上为透镜状、平面上为条带-舌状(图12a)。水道两侧, 悬浮载荷流体溢出, 形成天然堤及侧缘微向, 砂体厚度向两侧减薄, 沉积构造多为粒序层理、爬升波纹层理、不规则层理及不规则纹层(图12b), 发育细小的植物碎片。水道发育区在底床载荷作用下, 常对下伏地层产生较为强烈的侵蚀作用, 沉积单一正粒序旋回(图12a); 随着沉积能量向盆地

方向逐渐减弱, 水道的侵蚀能力变差, 沉积记录薄层反粒序-厚层正粒序地层(图11b)。水道砂体单层厚度大、发育频率高且储集物性好, 向两侧逐渐变薄、变少、变差。

在朵叶体发育区, 以悬浮载荷及上浮载荷为主。在水道沉积末端, 由于没有沟道约束, 沉积物以悬浮和上浮载荷的形式向四周扩散, 形成朵叶体沉积, 发育粒序层理、爬升波纹层理及不规则层理等沉积构造(图12c)。在平面上为扇形, 剖面上为薄层板状(图12c)。朵叶体向湖泊方向发育以羽流载荷为主的朵叶体侧缘微相(图11d), 该微相属于过渡相, 多为纹层构造泥质岩, 含大量植物碎片。朵叶体向湖泊方向, 砂体逐渐变薄、变少, 储集物性逐渐变差。天然堤与朵

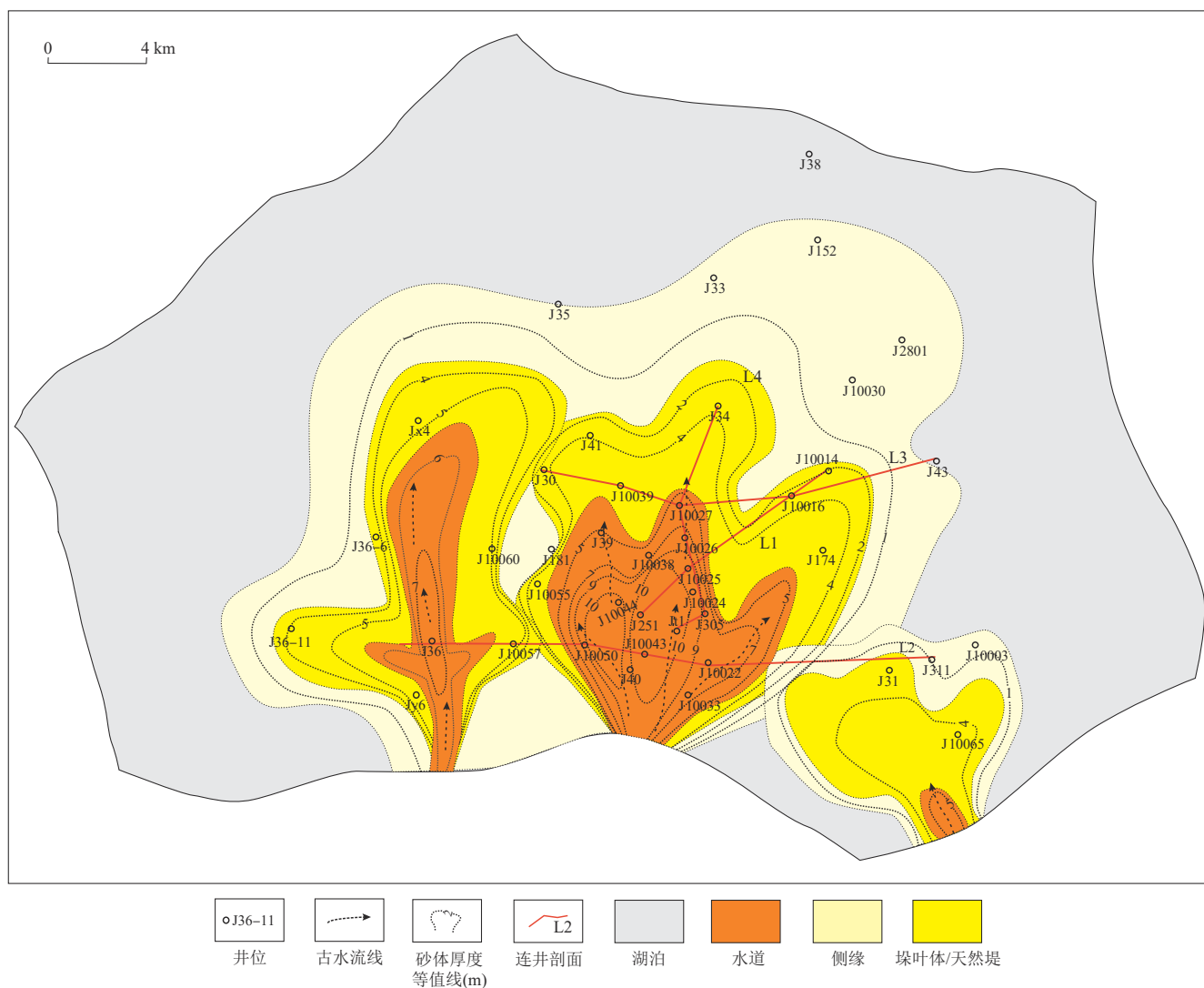


图 11 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组一段异重流沉积分布

Fig. 11 Distribution of hyperpycnal flow deposits in the 1st member of the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin

叶体在岩相构成上十分相似,均为悬浮载荷为主,主要是发育位置及平面形态的差异。朵叶体由于没有沟道束缚,其平面规模及连续性好于天然堤。在朵叶体发育区,由于悬浮载荷流体对下伏地层侵蚀作用弱,随着水流能量的频繁变化,多形成对偶粒序层理(Ha-Hb),这也是异重流的典型沉积构造之一。

5 芦草沟组异重流沉积储集特征

烃-储配置关系是油气富集的关键,优质烃源岩与储层直接接触为最佳烃-储配置关系^[28-29]。以J174井芦草沟组三段(上甜点)为例,该段为工区的主力产油层,也是优质的“甜点”层。开展岩心沉积微相、储层物性及总有机碳含量(TOC)解释,分析发现:①深度3 149.5~3 147.5 m段,发育2个朵叶体亚相单元,

朵叶体砂体孔隙度2%~5%,*TOC*为2.0%~4.5%;深度3 147.5~3 146.5 m段为深湖亚相,孔隙度小于2%,*TOC*为2.0%~12.0%;深度3 146.5~3 142.6 m段为水道亚相,孔隙度4%~8%,*TOC*为2.0%~12.0%(图13)。

②对应的岩心及薄片微观特征分析,朵叶体砂体成熟度低,见溶蚀孔,颗粒间发育不规则的暗色有机质(图14a);水道砂体粒度较朵叶体粗,但成熟度仍比较低,发育溶蚀孔,同样在颗粒间发育不规则的暗色有机质(图14b);天然堤微相主要是泥质粉砂岩,同样发育溶蚀孔及大量的不规则暗色有机质(图14c);侧缘-深湖泥岩中,溶蚀孔欠发育,暗色黏土及有机质发育程度高(图14d)。

③水道、朵叶体、天然堤和侧缘-深湖泥微相的孔隙度值依次变低、*TOC*依次变高,这符合正常的沉积规律。除此以外,朵叶体、水道及天然堤微相不仅发育溶蚀孔隙,且含有少量的

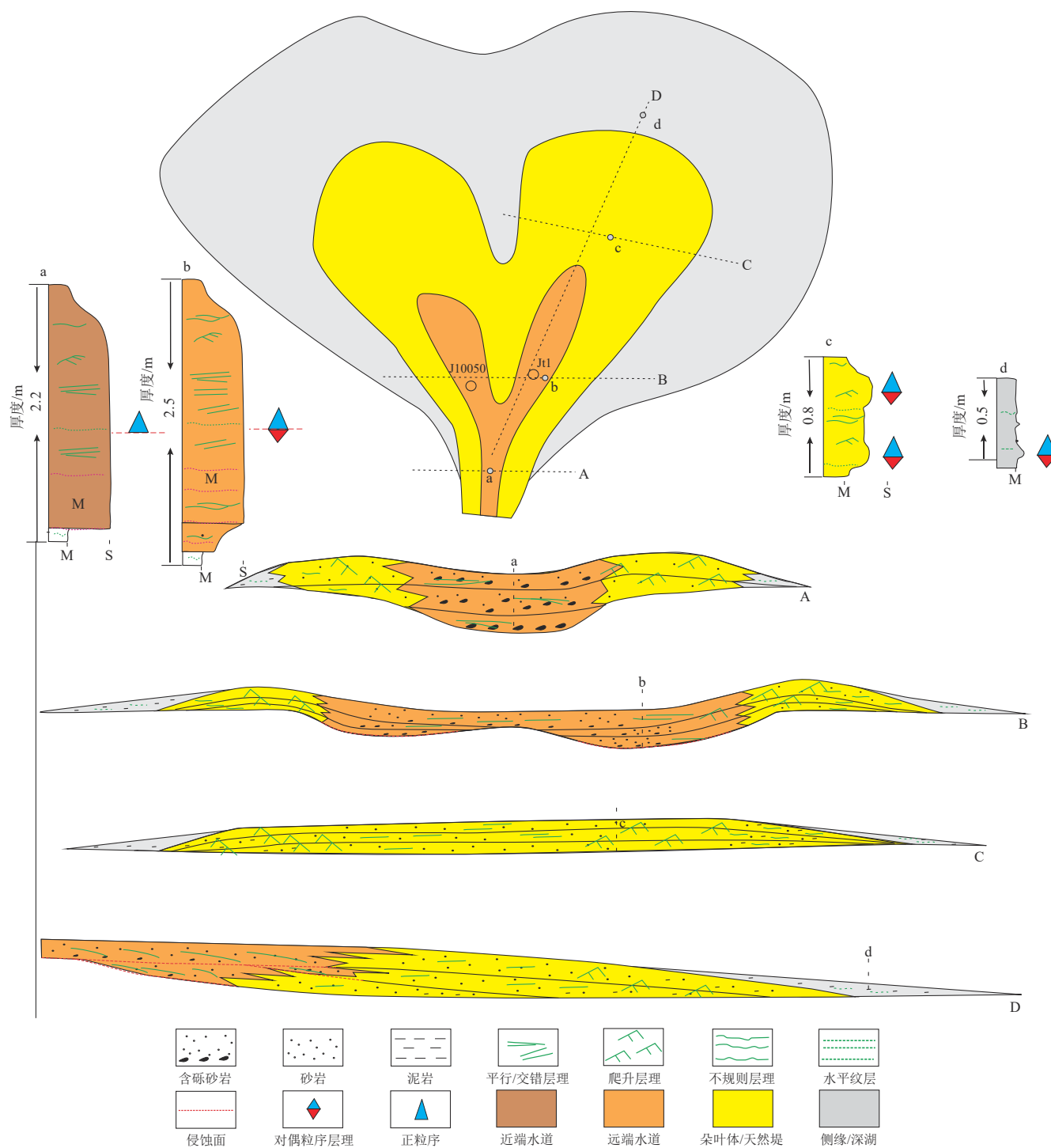


图 12 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组异重流沉积模式

Fig. 12 Sedimentary pattern of hyperpycnal flows in the Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag, Junggar Basin

A. 水道横切面, 含砾砂岩, 交错层理、爬升波纹, 天然堤-水道-天然堤; a. 水道纵切面, 正粒序, 底部侵蚀面; B. 水道末端横切面, 粉-细砂岩, 不规则层理、爬升波纹; b. 水道末端纵切面, 对偶粒序, 内部见侵蚀面; C. 天然堤/朵叶体横切面, 粉砂岩, 平行层理、爬升波纹; c. 天然堤/朵叶体纵切面, 对偶粒序; D. 侧缘/湖泊横切面, 泥岩, 水平纹层; d. 侧缘/湖泊纵切面, 块状、对偶粒序

(S为砂岩, M为泥岩。)

有机质、具有一定的 *TOC*, 该沉积现象明显有别于常规的河流三角洲体系。砂体结构成熟度低、不同程度的含有有机质碎片, 反映出异重流的成因属性: 洪水河流

携带陆源碎屑及有机质在湖泊区快速堆积。

洪水异重流携带陆源碎屑颗粒与有机质在深湖区快速堆积的沉积机制, 可以很好的解释上述沉积学现

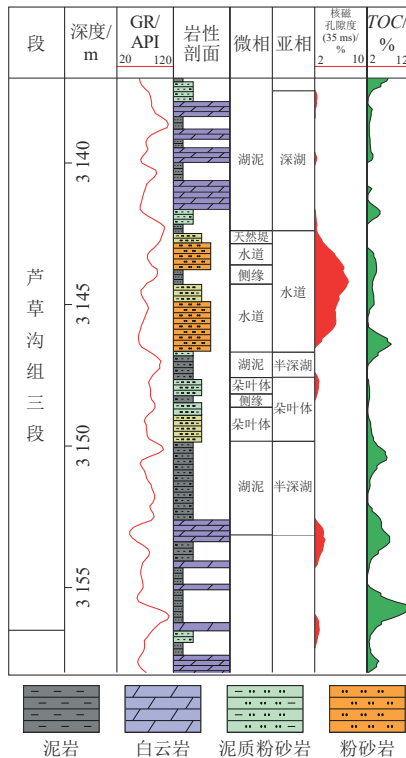


图 13 准噶尔盆地芦草沟组三段J174井不同微相烃储特征综合柱状图

Fig. 13 Composite stratigraphic column showing the source rock-reservoir characteristics of different sedimentary microfacies in well J174 of the 3rd member of the Lucaogou Formation, Junggar Basin

象。异重流无需特殊的触发机制,频繁的洪水可以直接将陆源碎屑颗粒及有机质从盆地边缘长距离搬运至盆地深水区,快速堆积,不仅有利于形成富有机质层,而且可以形成大面积分布的砂体,造成有机质层与砂体大面积直接接触、频繁互层(图7—图10),进而形成优质的页岩油“甜点”层。该认识为吉木萨尔凹陷“粗-细共存、源-储共生”高品质页岩油的成因提供了新的沉积学解释机制。

6 结论

1) 吉木萨尔凹陷芦草沟组内广泛发育湖泊异重流。其主要识别特征为对偶粒序层理及内部侵蚀面、陆源植物碎片。

2) 主力储层为异重流水道及朵叶体亚相。水道亚相岩性较粗,发育较强水动力沉积构造,厚度大、核磁孔隙度值高;水道亚相具有充填状地震反射特征,砂体厚层状加积充填,平面上为条带状或舌状,横向宽度较窄(1~3 km)。朵叶体亚相岩性较细,单层厚度较薄,核磁孔隙度较小;朵叶体亚相具有披覆地震反射特征,砂体薄层状,平面上为扇形,长度及宽度规模均超过10 km。

3) 芦草沟组沉积时期,南部山区频繁发生的洪水

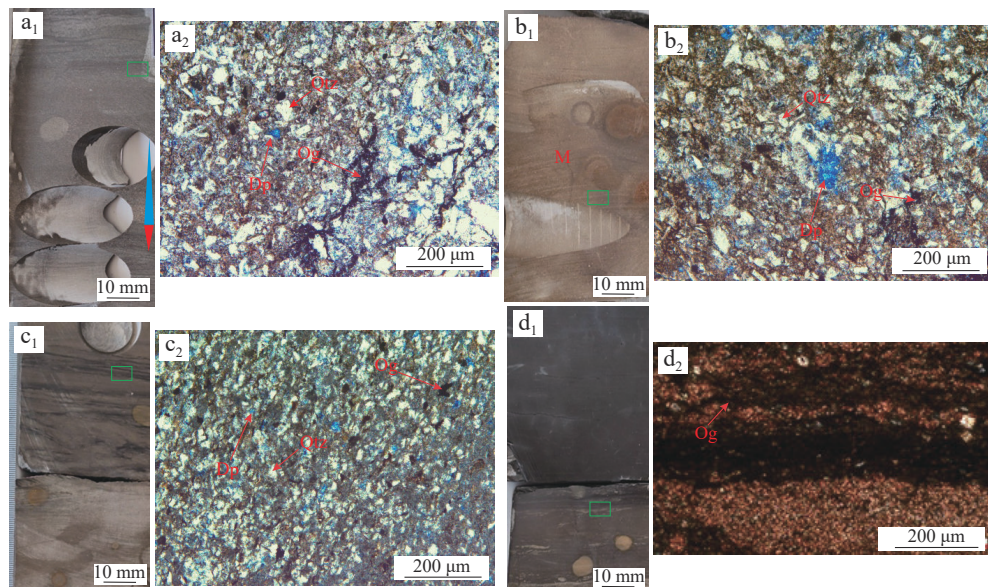


图 14 准噶尔盆地芦草沟组三段J174井不同微相微观烃-储特征照片

Fig. 14 Microscopic source rock-reservoir characteristics of different microfacies in well J174 of the 3rd member of the Lucaogou Formation, Junggar Basin

a₁. 粒序层理粉-细砂岩,朵叶体微相,埋深3 147.8 m,岩心;a₂. 砂岩成熟度低,以长英质(Qtz)为主,见少量溶蚀孔(Dp),薄片,见不规则的暗色有机质(Og),薄片;b₁. 块状层理粉-细砂岩(M),水道微相,埋深3 146.1 m,岩心;b₂. 砂岩成熟度低,以长英质(Qtz)为主,黏土及不规则暗色有机质(Og)约占比40%,见溶蚀孔(Dp),薄片;c₁. 不规则纹层泥质粉砂岩,天然堤微相,埋深3 143.6 m,岩心;c₂. 见溶蚀孔(Dp)及不规则暗色有机质团块(Og),薄片;d₁. 暗色泥岩,少量不规则纹层,侧缘-深湖泥微相,埋深3 144.9 m,岩心;d₂. 见层状暗色有机质(Og),溶蚀孔欠发育,薄片

异重流携带陆源碎屑及有机质,经过上百千米的搬运,在吉木萨尔凹陷深湖区快速沉积,既形成了砂岩储层,也为优质烃源岩的形成提供了良好条件,造成了水道-朵叶体砂体与异重流侧缘-深湖烃源岩大面积接触、频繁互层。

4)湖泊异重流沉积模式为吉木萨尔凹陷“粗-细共存、源-储共生”高品质页岩油的成因提供了新的沉积学解释机制。

参 考 文 献

- [1] BATES C C. Rational theory of delta formation [J]. AAPG Bulletin, 1953, 37(9): 2119-2162.
- [2] SYVITSKI J P M. Supply and flux of sediment along hydrological pathways: Research for the 21st Century [J]. Global and Planetary Change, 2003, 39(1/2): 1-11.
- [3] MULDER T, SYVITSKI J P M. Turbidity currents generated at river mouths during exceptional discharges to the world oceans [J]. The Journal of Geology, 1995, 103: 285-299.
- [4] MULDER T, SYVITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits. A review [J]. Marine and Petroleum Geology, 2003, 20 (6/8): 861-882.
- [5] MULDER T, ALEXANDER J. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits [J]. Sedimentology, 2001, 48(2): 269-299.
- [6] CLARE M A, TALLING P J, CHALLENGER P, et al. Distal turbidites reveal a common distribution for large (>0.1 km³) submarine landslide recurrence [J]. Geology, 2014, 42 (3): 263-266.
- [7] ZAVALA C, CARVAJAL, MARCANO, et al. Sedimentological indexes: a new tool for regional studies of hyperpycnal systems [C]// Sediment Transfer from Shelf to Deepwater-Revisiting the Delivery Mechanisms, Ushuaia, 2008. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2008: 1-4.
- [8] ZAVALA C, ARCURI M, DI MEGLIO M, et al. A genetic facies tract for the analysis of sustained hyperpycnal flow deposits [M]// SLATT R M, ZAVALA C. Sediment Transfer from Shelf to Deep Water—Revisiting the Delivery System. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2011: 31-51.
- [9] ZAVALA C, ARCURI M, GAMERO H, et al. The composite bed: A new distinctive feature of hyperpycnal deposition [C]// AAPG Annual Convention, Long Beach, 2007. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2007: 90063.
- [10] ZAVALA C, PONCE J J, ARCURI M, et al. Ancient lacustrine hyperpycnites: A depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) of west-central Argentina [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76(1): 41-59.
- [11] ZAVALA C, 潘树新. 异重流成因和异重岩沉积特征[J]. 岩性油气藏, 2018, 30(1): 1-18.
- ZAVALA C, PAN Shuxin. Hyperpycnal flows and hyperpycnites: Origin and distinctive characteristics [J]. Lithologic Reservoirs, 2018, 30(1): 1-18.
- [12] ZAVALA C, GAMERO H, ARCURI M. Lofting rhythmites: A diagnostic feature for the recognition of hyperpycnal deposits [C]// ALLISONP A, WELLSM R, PRATTB R. 2006 Philadelphia Annual Meeting: T137. EPI-Continental Seas in the Geological Record: The Limitations of the Uniformitarian Paradigm II, Philadelphia, 2006. Tulsa: Geological Society of America, 2006: 11.
- [13] PETTER A L, STEEL R J. Deepwater-slope channels and hyperpycnal flows from the Eocene of the central Spitsbergen Basin: Predicting basin-floor sands from a shelf edge/upper slope perspective [C]//AAPG Annual Meeting, Calgary, 2005. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists, 2005: 90039.
- [14] PAN Shuxin, LIU Huaqing, ZAVALA C, et al. Sublacustrine hyperpycnal channel-fan system in a large depression basin: A case study of Nen 1 Member, Cretaceous Nenjiang Formation in the Songliao Basin, NE China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(6): 911-922.
- [15] YANG Renchao, JIN Zhijun, VAN LOON A J (Tom), et al. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: Implications for unconventional petroleum development [J]. AAPG Bulletin, 2017, 101(1): 95-117.
- [16] 栾国强, 董春梅, 林承焰, 等. 异重流发育条件、演化过程及沉积特征[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(3): 438-453.
LUAN Guoqiang, DONG Chunmei, LIN Chengyan, et al. Development conditions, evolution process and depositional features of hyperpycnal flow [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39 (3): 438-453.
- [17] 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 等. 深水重力流水道-朵叶体系形成演化及储层分布——以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组露头为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 917-928.
LI Hua, HE Youbin, TAN Mengting, et al. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: A case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 917-928.
- [18] 邵雨, 杨勇强, 万敏, 等. 吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组沉积特征及沉积相演化[J]. 新疆石油地质, 2015, 36(6): 635-641.
SHAO Yu, YANG Yongqiang, WAN Min, et al. Sedimentary characteristic and facies evolution of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 635-641.
- [19] 杨志浩, 李胜利, 于兴河, 等. 准噶尔盆地南缘中二叠统芦草沟组富砂型湖泊深水扇沉积特征及其相模式[J]. 古地理学报, 2018, 20(6): 989-1000.
YANG Zhihao, LI Shengli, YU Xinghe, et al. Sedimentary

- characteristics and facies model of deep-water fan in sand-rich lake of the Middle Permian Lucaogou Formation in southern Junggar Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2018, 20(6): 989–1000.
- [20] 李书琴, 印森林, 高阳, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷芦草沟组混合细粒岩沉积微相[J]. *天然气地球科学*, 2020, 31(2): 235–249.
- LI Shuqin, YIN Senlin, GAO Yang, et al. Study on sedimentary microfacies of mixed fine-grained rocks in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2020, 31(2): 235–249.
- [21] 张奎华, 曹忠祥, 王越, 等. 博格达地区中二叠统芦草沟组沉积相及沉积演化[J]. *油气地质与采收率*, 2020, 27(4): 1–12.
- ZHANG Kuihua, CAO Zhongxiang, WANG Yue, et al. Sedimentary facies and evolution of Middle Permian Lucaogou Formation in Bogda area [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2020, 27(4): 1–12.
- [22] 王越, 林会喜, 张奎华, 等. 博格达山周缘中二叠统芦草沟组与红雁池组沉积特征及演化[J]. *沉积学报*, 2018, 36(3): 500–509.
- WANG Yue, LIN Huixi, ZHANG Kuihua, et al. Sedimentary characteristics and evolution of the middle Permian Lucaogou Formation and Hongyanchi Formation on the periphery of Bogda Mountain [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(3): 500–509.
- [23] 李映艳, 陈轩, 高阳, 等. 井震结合分析页岩油“甜点”沉积特征及分布——以吉木萨尔凹陷芦草沟组“下甜点”为例[J]. *断块油气田*, 2023, 30(2): 186–195.
- LI Yingyan, CHEN Xuan, GAO Yang, et al. Sedimentary morphologies and distributions of shale oil “sweet spot” by the data of well to seismic analysis: A case study of the lower sweet spot in Lucaogou Formation of Jimsar Sag [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2023, 30(2): 186–195.
- [24] 邓远, 陈轩, 覃建华, 等. 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[J/OL]. *岩性油气藏*: 1–9 [2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1195.TE.20230425.1035.004.html>.
- DENG Yuan, CHEN Xuan, QIN Jianhua, et al. Paleogeomorphology and favorable reservoir distribution of the first member of Permian Lucaogou Formation in Jimsar Sag [J/OL]. *Lithologic Reservoirs*: 1–9 [2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1195.TE.20230425.1035.004.html>.
- [25] 印森林, 陈恭洋, 许长福, 等. 陆相混积细粒储集岩岩相构型及其对甜点的控制作用——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组页岩油为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1180–1193.
- YIN Senlin, CHEN Gongyang, XU Changfu, et al. Lithofacies architecture of lacustrine fine-grained mixed reservoirs and its control over sweet spot: A case study of Permian Lucaogou Formation shale oil reservoir in the Jimsar Sag, Juggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1180–1193.
- [26] 马克, 侯加根, 董虎, 等. 页岩油储层混合细粒沉积孔喉特征及其对物性的控制作用——以准噶尔盆地吉木萨尔凹陷二叠系芦草沟组为例[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(5): 1194–1205.
- MA Ke, HOU Jiagen, DONG Hu, et al. Pore throat characteristics of fine-grained mixed deposits in shale oil reservoirs and their control on reservoir physical properties: A case study of the Permian Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(5): 1194–1205.
- [27] 支东明, 宋永, 何文军, 等. 准噶尔盆地中一下二叠统页岩油地质特征、资源潜力及勘探方向[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(4): 389–401.
- ZHI Dongming, SONG Yong, HE Wenjun, et al. Geological characteristics, resource potential and exploration direction of shale oil in Middle-Lower Permian, Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 389–401.
- [28] WANG Jian, CAO Yingchang, WANG Xintong, et al. Sedimentological constraints on the initial uplift of the West Bogda mountains in Mid-Permian [J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 1453.
- [29] 孙龙德, 赵文智, 刘合, 等. 页岩油“甜点”概念及其应用讨论[J]. *石油学报*, 2023, 44(1): 1–13.
- SUN Longde, ZHAO Wenzhi, LIU He, et al. Concept and application of “sweet spot” in shale oil [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2023, 44(1): 1–13.

(编辑 梁 慧)