

doi:10.3969/j.issn.2097-0013.2025.01.011

渤海湾盆地车西洼陷沙三-沙四段古环境演化特征

刘杰^{1,2}, 李敏¹, 陈盼盼¹, 李存磊¹, 段长江³, 王宝春¹, 夏晓朵¹, 孟龙起¹

LIU Jie^{1,2}, LI Min¹, CHEN Pan-Pan¹, LI Cun-Lei¹, DUAN Chang-Jiang³,
WANG Bao-Chun¹, XIA Xiao-Duo¹, MENG Long-Qi¹

1. 辽宁石油化工大学, 辽宁抚顺 113005; 2. 中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 陕西西安 710054;
3. 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452

1. Liaoning University of Petroleum and Chemical Technology, Fushun 113005, Liaoning, China; 2. Xi'an Engineering
Investigation & Design Research Institute of China National Nonferrous Metals Industry Co., Ltd., Xi'an 710054,
Shanxi, China; 3. CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin 300452, China

摘要: 由于浅海陆架区重力流沉积具有特征不典型和规模较小等特点, 以往的研究多仅限于对其进行简单的描述, 目前对其沉积特征与成因机理的认识还不够充分, 对影响其发展的主控因素和作用机理尚不清楚。本文以渤海湾盆地车西洼陷沙三-沙四段的重力流沉积为研究对象, 分析形成车西洼陷沙三-沙四段重力流发育特征的古环境条件, 总结沉积模式, 并探讨其地质意义。车西洼陷沙三-沙四段的古气候指数 C 以及 Fe/Mn 指标均指示沙四段沉积期气候干燥, 沙三段沉积期整体较沙四段沉积期湿度更高, 主要为半湿润-湿润气候。Sr/Ba 指标指示沙四段沉积期处于咸水环境中, 沙三段沉积期处于淡水-半咸水环境中。依据研究区沉积物分布规律以及沉积构造特征等计算出该区沙三段和沙四段的平均最大古水深分别为 60.07 m 和 20.32 m。根据车西洼陷沙三段及沙四段的岩心特征分析, 结合该区沉积环境及地形研究认为沙三段发育滑塌沉积、碎屑流沉积、浊流沉积, 沙四段发育泥石流沉积。

关键词: 渤海湾盆地; 车西洼陷; 沙三-沙四段; 重力流沉积; 古环境演化

中图分类号: P53

文献标识码: A

文章编号: 2097-0013(2025)-01-0136-12

Liu J, Li M, Chen P P, Li C L, Duan C J, Wang B C, Xia X D and Meng L Q. 2025. Characteristics of Palaeoenvironmental Evolution in the Shasan-Shasi Section of the Chexi Depression in the Bohai Bay Basin. *South China Geology*, 41(1): 136-147.

Abstract: Due to the untypical features and comparatively smaller scale, previous studies on gravity flow deposits in shallow marine shelf areas are mostly limited to simple descriptions, so the understanding of their sedimentary characteristics and genesis mechanisms is not sufficient, and the main controlling factors and mechanisms affecting their development are not known. In this paper, the gravity flow deposits of the Shasan-Shasi section in Chexi Depression, Bohai Bay Basin have been studied, the palaeoenvironmental conditions and depositional patterns affecting the developmental characteristics of gravity currents in the Shasan-Shasan section of the Chexi Depression has been analyzed, and geological significance has been further discussed.

收稿日期: 2024-08-19; 修回日期: 2024-12-03

基金项目: 陕西省能源化工研究院地质科研项目(2016YFE0102500-08)

第一作者: 刘杰(1981—), 男, 高级工程师, 主要从事石油与天然气工程及二氧化碳捕集和利用及气体净化领域工作, E-mail: 11105400@qq.com

The palaeoclimate index C and the Fe/Mn index of the Shasan-Shasi section sediments in Chexi Depression indicate that during the sedimentation period of Shasi section the climate has been dry, and slightly more humid during the sedimentation period of the Shasan section, mainly semihumid to humid. The Sr/Ba index indicates that the Shasi section sediments has been deposited in a brackish water environment, while the Shasan section sediments has been deposited in a fresh-brackish water environment. Based on the sediment distribution pattern and the sedimentary structural characteristics in the study area, it could be calculated that the average maximum paleowater depths of the Shasan and Shasi section would be 60.07 m and 20.32 m, respectively. Based on the characteristics of the core samples of the Shasan-Shasi section in Chexi Depression, combined with the sedimentary environment and topography study in the area, it can be deduced that the Shasan section has developed slump deposits, sediment flow deposits, turbidity currents deposits, while the Shasi section has developed mudstone flow deposits.

Key words: Bohai Bay Basin; Chexi Depression; Shasan-Shasi section; gravity flow deposition; palaeoenvironmental evolution

深水重力流是陆上沉积物向深水盆地输运沉积的主要形式,是形成深水环境广泛分布的粗碎屑沉积物及其伴生的细碎屑沉积物的主要途径(Mulder and Alexander, 2001; Talling et al., 2013)。由于深水重力流的形成多与地震、洪水等事件诱发的沉积作用息息相关,同时深水环境中建设有与日常生活息息相关的海底电缆、输油管道等,研究深水重力流砂体的形成和分布对保护海底电缆、输油管道等具有重要的现实意义(Talling et al., 2013; Yang T et al., 2015; Yang R C et al., 2017),更重要的是对研究全球沉积物的搬运过程、稳定的碳循环过程、塑料微粒全球循环机制、地震(洪水、海啸)等自然灾害的再发周期研究有重要的科学意义(Galy et al., 2007; Clarke, 2016; Clare et al., 2016; Kane et al., 2020)。此外,深水重力流沉积多为油气富集的有利场所,其相关研究同样能促进油气的高效勘探与开发(Yang R C, 2017)。

前人在陆架坡折带下发育的半深湖-深湖区中大规模深水重力流体系统已有较多研究,在其形成背景、沉积特征、沉积方式、成因机制、控制因素及油气聚集和勘探等领域,已有较多的研究成果(Kolla et al., 2001; US Department of the Interior, 2004; Weimer and Slatt, 2004)。温暖湿润的气候环境是细粒重力流沉积发育的主要背景(邹才能等, 2023)。在气候相对潮湿的环境下,随

着入湖水流量的增加,从盆地边缘向盆地内部,粗粒重力流性质逐渐转变为细粒牵引流性质(王健和操应长, 2013);而在气候相对干旱时期,入湖水流流量减小,重力流沉积作用仅发生在盆地洼陷带局限的湖泊范围内。相对于深水重力流的研究,尽管已有一些关于浅海陆架区重力流沉积物的研究,但因其具有重力流沉积特征不典型和规模较小等特点,以往的研究多仅限于对其进行简单的描述(Tokuhashi, 1996; Kolla et al., 2001),目前对其沉积特征与成因机理的认识还不够充分,对影响其发展的主控因素和作用机理尚不清楚(Tokuhashi et al., 1996; Villa and Bahamonde, 2001; Weimer and Slatt, 2004)。

我国渤海湾盆地车西地区重力流沉积发育。车西地区北部陡坡带紧靠埕南断层,在构造运动的作用下,发育二台阶断层与多条次级断层,并且在二台阶的不同构造部位所受构造运动的强度不同,其顶部遭受风化、剥蚀的程度也不同,出露不同层段的地层。在车西南部缓坡带发育下古生界单斜断块潜山,其又分为上覆石炭系、二叠系与上覆新生代地层两种类型。这两种类型潜山主要发育于车西南坡反向断层的上升盘,由于断层的活动等构造作用产生许多构造裂缝,这些裂缝又为地下水对潜山的溶蚀作用提供了有利的条件。而潜山顶面均长期出露地表,遭受风化、剥蚀、淋滤等作用,产生许多的溶蚀孔、洞、缝等,这些孔、

洞、缝相互连接形成一个立体的储集系统,从而在风化壳附近形成良好的储集空间(李茹, 2008)。古近系沙河街组为车西地区主要的生油岩系,自下而上可分为沙四段、沙三段、沙二段、沙一段,本文以沙三-沙四段的重力流沉积为研究对象,通过对断陷湖盆深水重力流沉积类型的系统研究,旨在解析研究区重力流沉积的演化过程,建立沉积模式,探讨古水深、古气候和古盐度对重力流沉积特征的影响,以期为陆相湖盆深水重力流沉积油气勘探提供理论基础。

1 区域地质背景

车西地区构造运动的形成和发展可分为4个阶段:太古宙、元古宙为结晶基底形成与抬升剥蚀阶段;古生代为稳定克拉通阶段;中生代为三叠纪褶皱隆升与潜山雏形形成,侏罗-白垩纪断块抬升与潜山发育阶段;古近纪为断陷发育与古潜山定型阶段,新近纪为坳陷发育、整体掩埋与潜山成藏

阶段。车西洼陷位于渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷的西部,是一个北东向延伸、北断南超的箕状断陷盆地(于兴河等, 2007; Okay et al., 2011; Wang J H et al., 2017)。其东部与垦东凸起相接,西部为庆云凸起,北部为埕子口凸起,南部为义和庄凸起(图1)。车西洼陷上古生界地层发育不全,缺失泥盆系和下石炭统,从老到新发育上石炭统和二叠系;上石炭统主要发育本溪组、太原组和山西组,二叠系主要发育下石盒子组、上石盒子组,缺失石千峰组。

2 材料与方法

2.1 样品来源

本次工作研究样品采集于车西洼陷地区车141井、车古25井、车275井、车142井、车273井及车404井,共选取了150件代表性的灰色油斑细砂岩、棕褐色油浸粉细砂岩及黄色白云质灰岩样品开展研究。

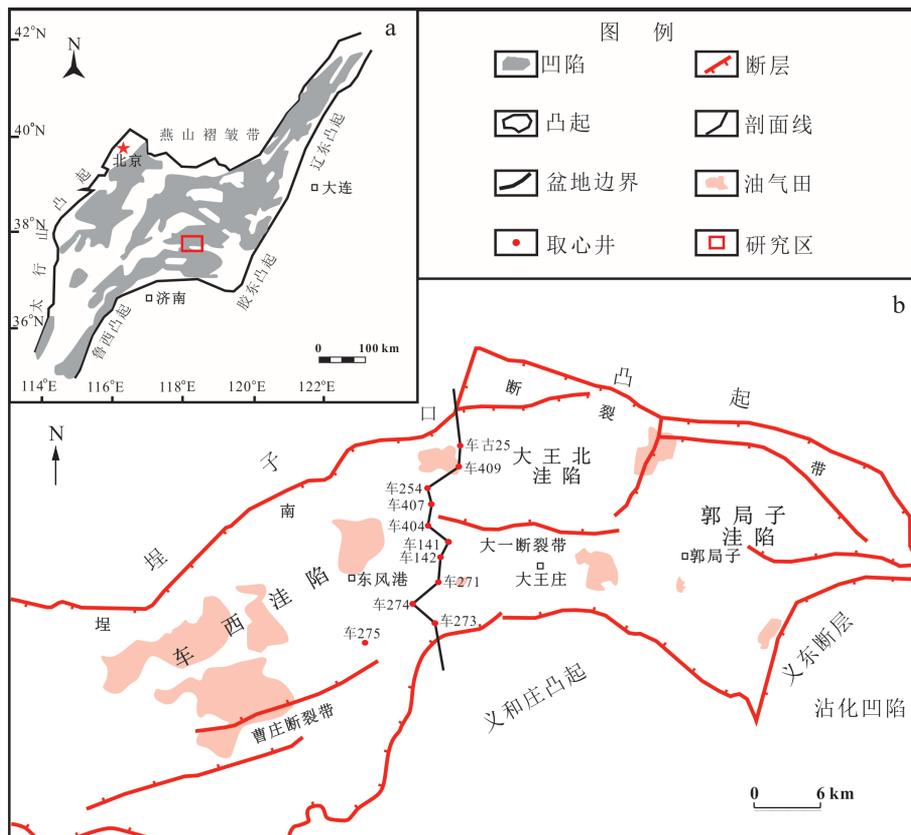


图1 车西地区在渤海湾盆地中的地理位置图(a)和车西地区构造简图(b)

Fig. 1 Geographical location map of the Chexi area in Bohai Bay Basin (a) and structural map of Chexi area (b)

据康玉柱等(2023)修改

2.2 实验方案

河北廊坊尚艺岩矿检测有限公司对试样进行了研磨处理,将试样研磨成 0.03 mm 厚的薄片,并在实验室中进行了鉴别工作。北京核工业研究院分析检测所对试样进行了分析检测。使用美国制造的电感耦合等离子体原子发射光谱仪,测定了液体样品中铁(Fe)、锌(Zn)、钡(Ba)、锰(Mn)、钴(Co)、镍(Ni)、镁(Mg)、锶(Sr)、铬(Cr)等元素的浓度(依据 GB5009.268-2016 标准);采用 70% 浓度的硝酸(16 M,比重 1.42)和 70% 的高氯

酸(11.6 M,比重 1.66),按照体积比例 10 : 1 配制混合酸。样品在干燥箱(型号:DHG-9240A)中进行干燥、粉碎和筛分。使用电子天平(型号:BSM220.4,上海卓精)精确称取 0.5 g 粉末,放入玻璃消解器中,将含有乙醇和 CO₂ 的样品置于恒温电热板上,使用 10 mL 的浓硝酸-高氯酸混合酸进行消解,直至消解液呈无色或微黄色。随后,在室温下加入水定容至 50 mL,充分混匀,过滤去除杂质,并测定滤液中的微量元素含量。主量、微量元素的测定结果和有关参数如表 1、2 和图 2 所示。

表 1 车西洼陷沙三-沙四段砂岩主量元素含量 (%) 及相关参数

Table 1 Major elements content (%) and related parameters of sandstones in the oil formation group of the Shasan-Shasi section of the Chexi Depression

样品	岩性	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	MnO	K ₂ O/Na ₂ O
C11	砂岩	3.56	1.62	0.74	0.23	0.61	0.03	1.21
C26	砂岩	2.33	1.13	0.55	0.21	0.44	0.28	1.25
C147	细砂岩	2.57	0.95	0.45	0.21	0.51	0.34	0.88
M2	砂岩	4.95	2.46	1.23	0.32	0.86	0.01	1.43
M76	细砂岩	1.75	6.14	3.11	1.32	0.25	0.20	12.44
M88	细砂岩	6	3.6	1.67	0.63	1.41	0.03	1.18
M141	白云质砂岩	7.79	4.04	1.56	0.71	1.6	0.02	0.98
M156	砂岩	4.39	5.16	1.9	0.59	0.88	0.06	2.16
Q112	砂岩	8.01	2.99	0.94	0.46	1.3	0.03	0.72
Y96	细砂岩	7.02	6.63	2.62	0.86	1.71	0.03	1.53
Y123	细砂岩	4.64	1.64	0.52	0.23	1.36	0.03	0.38
Y254	白云质砂岩	4.79	3.32	1.25	0.5	1.2	0.05	1.04
平均值		4.82	3.13	1.40	0.44	0.78	0.10	2.12
UCC		15.2	5.0	3.4	2.2	3.9	0.08	0.87

注: UCC为土地壳元素丰度值,据孙际茂等(2007),表2同

表 2 车西洼陷沙三-沙四段砂岩微量元素含量 ($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace element content ($\times 10^{-6}$) of sandstones from the Shasan-Shasi section of the Chexi Depression

样品	岩性	V	Cr	Co	Ni	Sr	Ba	Zn
CX-4	白云质砂岩	44.22	119.2	6.67	14.53	91.76	225.7	75.4
C10	细砂岩	30.79	123.4	5.42	11.17	348.6	131.1	105.1
C26	细砂岩	30.31	135.04	4.39	9.23	237.6	116	65.3
M133	细砂岩	62.8	126.35	12.24	23.86	156	256	77.5
M156	砂岩	62.44	131.5	4.89	6.78	326	212	63.2
M171	砂岩	56.25	126.63	12.6	17.82	151.7	229.2	78.1
M236	砂岩	76.94	116.5	12.74	21.66	170.4	188.1	77.3
M246	砂岩	48.59	125.43	16.06	16.57	152.2	345.9	62.0
Q94	砂岩	80.48	124.34	8.56	25.72	230	1172	61.4
Y96	砂岩	82.83	106.76	18.3	41.11	231.1	438.4	104.8
Y174	砂岩	50.11	128.44	4.76	14.92	180.1	692.2	178.5
Y223	砂岩	45.82	144.26	9.18	20.49	329.9	220.2	181.2
平均值		56.43	125.65	9.91	19.39	207.14	340.09	94.15
UCC		60.00	35.00	10.00	20.00	350.00	550.00	71.00

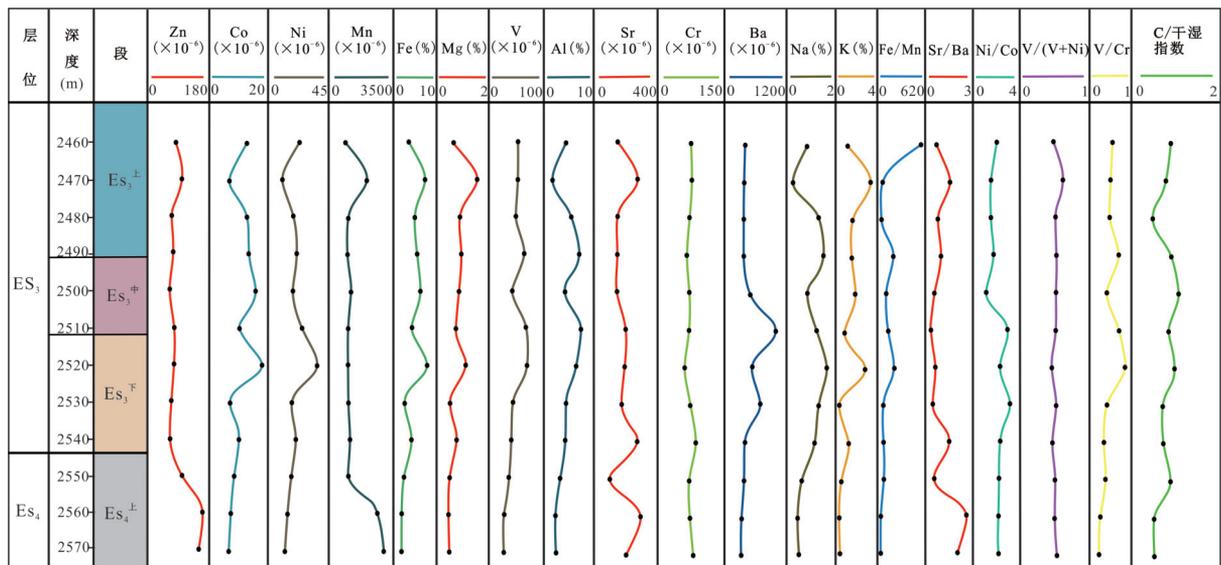


图2 车271井沙三-沙四段砂岩主量元素及微量元素随深度变化

Fig. 2 Variation of major and trace elements with depth in the Shasan-Shasi section of Che 271 wells

3 主量、微量元素特征及其纵向变化特征

3.1 主量元素特征

车镇凹陷中车西洼陷沙三-沙四段砂岩主量元素含量与 UCC 标样主量元素丰度值(Huang Y T et al., 2021)相比, MnO 含量基本相近, Fe₂O₃ 含量相对较低, MgO、Na₂O、K₂O 都低于标样丰度值。K₂O/Na₂O 在 0.38 ~ 12.44 之间, 平均值为 2.12, 总体比上部陆壳(0.87)高(表 1), 说明样品中的含钾矿物较多。

3.2 微量元素特征

微量元素测试结果(表 2)显示, 车西洼陷沙三-沙四段砂岩中 Co、V、Cr 等微量元素含量分别为 $4.39 \times 10^{-6} \sim 18.3 \times 10^{-6}$ 、 $30.31 \times 10^{-6} \sim 82.83 \times 10^{-6}$ 和 $106.76 \times 10^{-6} \sim 144.26 \times 10^{-6}$, 平均含量分别为 9.65×10^{-6} 、 55.97×10^{-6} 和 125.65×10^{-6} 。与上部陆壳微量元素丰度值相比, 研究区砂岩样品的 Cr 相对较高, Co、Ni 含量均相近, 整体来看 Sr、Ba 亏损相对较强烈。

3.3 主、微量元素纵向变化特征

由图 2 可知 Sr 元素在沙三中亚段含量最低, V、Ba 在沙三中亚段及沙三下亚段含量较高, Zn、Mn 元素及 Sr/Ba 比值在沙四段含量较高。Co、Ni

在沙三下亚段含量较高, K 在沙四上亚段含量较低。

4 沉积环境分析

由于沉积区的古气候、古水深以及氧化还原条件的不同, 造成了元素分布规律的不同(付金华等, 2018)。然而, 仅靠某一种元素含量偏高或偏低或者仅通过一种或两种元素比值的变化进行沉积环境的研究准确性不高, 可能会导致结果出现偏差。为了避免这种情况, 本文采用多种元素及其比值分析来进行结果的相互验证。

4.1 古气候及古盐度

在气候干旱的情况下, 湖泊蒸发作用强烈, 水体随之变浅, Ba、Sr、Na、K 在这个过程中析出并富集; 在湿润气候条件下, 蒸发量减弱, 降水增多, Fe、Mn、Cr、V 等元素富集, 并有一定程度的增加(杨万芹, 2018)。本文拟采用两种对气候干湿敏感性较强的元素的比值来指示古气候, 并以干湿指数 C 作为定量指标。一般来说, C 较高表示气候较为湿润和温暖, 反之, 气候较为干燥和寒冷(蓝先洪等, 1987; 付金华等, 2018; 杨万芹, 2018; 茆书巍等, 2021)。Sr/Ba 是公认的古盐度研究指标, $Sr/Ba < 0.5$ 水体为淡水环境, $0.5 \leq Sr/Ba \leq 1$ 为半咸水湖环境, $Sr/Ba > 1$ 为咸水环境(孙彩蓉, 2017)。

通过图 2 可知相较于沙四上亚段、沙三上及沙三下亚段, 作为表生环境中较活泼的 Sr 元素在沙三中亚段含量最低, 反映出沙三中亚段沉积环境较为潮湿, 营养元素 Zn、V、Ba 等在沙三中亚段以及沙三下亚段中含量较高, 反映出沙三中以及沙三下亚段, 湖水淡化, 为高湖面期, 综合说明沙三中亚段沉积时期的气候潮湿(王健和操应长, 2013)。

通过对沙三-沙四泥岩样品干湿指数 $[C=\sum(Fe+Mn+Cr+V+Co+Ni)/\sum(Ca+Mg+Sr+Ba+K+N)]$

的计算: 沙三段的干湿指数为 0.01 ~ 1.1, 沙四段的干湿指数为 0.01 ~ 0.6, 沙四段沉积期气候干燥, 为干旱气候, 沙三段则较沙四段更潮湿, 以半湿润-湿润气候为主(图 2)。

沙三上亚段 Fe/Mn 比值在 10.78 ~ 600 之间, 平均值为 210.54, 说明沙三上亚段沉积时期处于一个较为潮湿的气候, 沙四上亚段 Fe/Mn 比值在 12.83 ~ 64.18 之间, 平均值为 23.67 (图 3a), 表明沙四上亚段沉积时期为干旱气候(茆书巍等, 2021)。

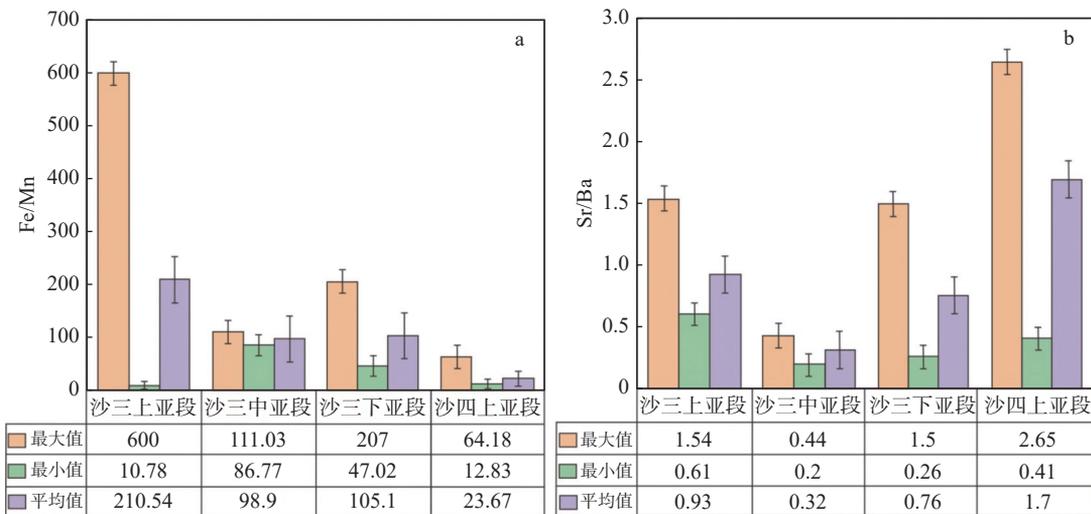


图 3 沙三-沙四各亚段元素比值柱状图

Fig. 3 Element ratio profile for the Shasan-Shasi subsection

沙四上亚段 Sr/Ba 值在 0.41 ~ 2.65 之间, 平均值为 1.7, 是一种咸水沉积环境, 在沙三中亚段 Sr/Ba 值在 0.2 ~ 0.44, 平均值为 0.32, 是一种淡水沉积环境(图 3b)。Sr/Ba 值演化特征显示, 从沙四段到沙三段的古水体盐度呈现出一种由高到低至沙三上亚段再升高的沉积演化过程(茆书巍等, 2021)。

4.2 氧化还原状态

水体分层程度与水体的氧化还原状态有着紧密的联系, 且二者与水深有着密切的关系, 在深水处, 水深越大 V、Fe 含量越高, 而在浅水处, 水深越浅 Ni、Cr 含量越高。因此, 较高的 V/(V+Ni), V/Cr 值能反应水体有较好的分层及还原能力(蓝先洪等, 1987; 孙彩蓉, 2017; 杨万芹, 2018)。

车镇凹陷沙三段 V/Cr 值及 V/(V+Ni) 值相对

较高, 说明沙三段沉积期水体分层性及还原性较好, 由图 4 可知沙三段整体处于贫氧-缺氧的环境中, 有利于有机质的保存。沙四段沉积期水体较浅, 为贫氧环境(张彬和姚益民, 2013; 杨海欧等, 2017)。

4.3 古水深

利用已有的元素地球化学资料难以精确反演古水深, 本文主要是通过沉积物展布、沉积构造及自生矿物的发育来反演古水深(陈亮等, 2002)。

(1) 沉积物分布规律

对岩心、测井等资料的综合分析可知沙三段处于半深湖-深湖的沉积环境, 沙四上亚段发育扇三角洲沉积(图 5), 这与韩敏等(2009)的研究结论可以相互佐证。半深湖-深湖相最大古水深小于等于 100 m, 扇三角洲相最大古水深小于等于 30 m

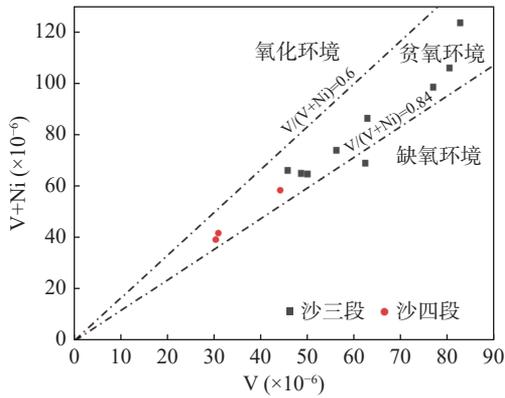


图4 车西洼陷沙三-沙四段氧化还原指标 V/(V+Ni) 散点图
Fig. 4 Scatter plot of redox indicator V/(V+Ni) in the Shasan-Shasi section of Chexi Depression

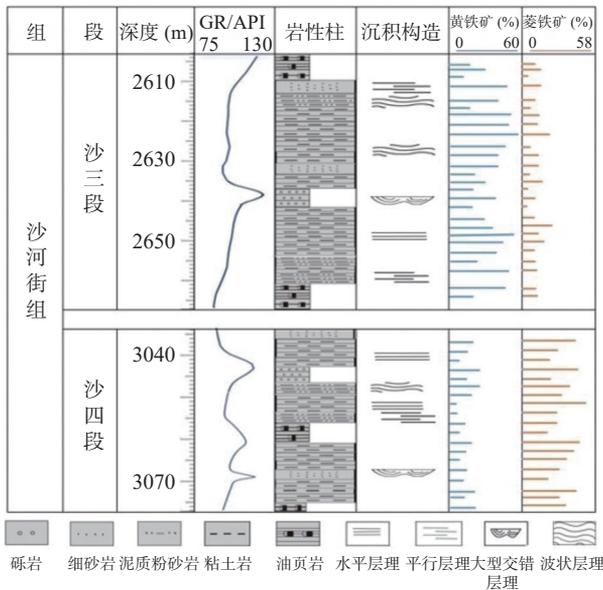


图5 车西洼陷车 660 井沙三-沙四段岩心古水深分析
Fig. 5 Paleohydrological analyses of cores from Che 660 wells in the Shasan-Shasi section of the Chexi Depression

(表3), 基于此我们进行有关沉积物分布规律的古水深计算。

参考表3, 沙三段暗色泥岩及油页岩最大深度取值为 100 m, 沙四段暗色泥岩及油页岩最大深度取值为 30 m。砾岩、泥质粉砂岩、暗色泥岩以及油页岩可代表不同的古水深(表4)。计算古水深公式(杜庆祥等, 2016)如下:

沙三段: $h_{max} = (10 \times w + 20 \times x + 100 \times y + 100 \times z) / (w + x + y + z)$

沙四段: $h_{max} = (10 \times w + 20 \times x + 30 \times y + 50 \times z) / (w + x + y + z)$

h_{max} 为最大古水深, w 、 x 、 y 和 z 代表的是

表3 沉积相对应水深

Table 3 Corresponding water depths for different sedimentary facies

沉积相	水深(m)
冲积—河流相	1 ~ 10
扇三角洲	3 ~ 30
滨湖相	1 ~ 5
浅湖相	5 ~ 20
半深湖-深湖相	20 ~ 100

注: 据陈亮等(2002)修改

表4 不同岩性对应水深

Table 4 Corresponding water depths for different lithologies

岩性	水深(m)
砾岩、砂岩	1 ~ 10
泥质粉砂岩	5 ~ 20
暗色泥岩	>20
油页岩	>50

注: 据张世奇和任延广(2003)修改

不同岩性在全部岩性中所占的比例, 分别对应为砾岩、砂砾岩、泥质粉砂岩、暗色泥岩和油页岩。根据上述公式计算得出: 沙三段最大古水深为 54.7 m, 沙四段最大古水深为 25.8 m。

(2) 沉积构造

湖泊沉积中的各种沉积构造类型与湖泊水深大小以及水动力强弱有关(表5)。岩石层理的发育受湖盆水动力条件的影响, 处于浅水区的岩石受湖水冲刷的频率高, 其主要发育平行层理以及大型交错层理(图5), 处于深水、较深水区的岩石, 处于静水环境中, 受水动力条件影响较弱, 基本不受湖水冲刷, 该环境中适合连续韵律发育, 有利于微细水平层理的发育(杜庆祥等, 2016)。

沙三段水平层理最大深度取值为 100 m, 沙

表5 不同沉积构造对应水深

Table 5 Water depth corresponding to different sedimentary structures

沉积构造	水深(m)
大型交错层理	0.5 ~ 5
波状层理、平行层理	5 ~ 20
水平层理	>17

注: 据张世奇和任延广(2003)修改

四段水平层理最大深度取值为 30 m。利用不同沉积构造恢复古水深公式(杜庆祥等, 2016)如下:

$$\text{沙三段: } h_{\max} = (5 \times x + 20 \times y + 100 \times z) / (x + y + z)$$

$$\text{沙四段: } h_{\max} = (5 \times x + 20 \times y + 30 \times z) / (x + y + z)$$

其中 x 、 y 、 z 分别为交错层理、平行层理和平层理在全部沉积构造类型中所占的比例, 利用沉积构造恢复沙三段最大古水深为 58.5 m, 沙四段最大古水深为 16.42 m。

(3) 自生矿物

砂岩中自生矿物赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿和黄铁矿可代表不同的氧化还原条件, 进而间接反映古水深(张世奇和任延广, 2003; 表 6), 故可通过计算自生矿物含量加权平均值的方法恢复测井的古水深。

根据自生矿物计算古水深的公式如下:

$$\text{沙 三 段 : } h_{\max} = (1 \times w + 3 \times x + 15 \times y + 100 \times z) /$$

表 6 某些自生矿物与水深对应关系

Table 6 The relationship between water depths and the different authigenic minerals

自生矿物	水深(m)
赤铁矿	0 ~ 1
褐铁矿	1 ~ 3
菱铁矿	3 ~ 15
黄铁矿	>15

注: 据张世奇和任延广(2003)

$$(w + x + y + z)$$

$$\text{沙 四 段 : } h_{\max} = (1 \times w + 3 \times x + 15 \times y + 30 \times z) / (w + x + y + z)$$

其中 w 、 x 、 y 、 z 分别为赤铁矿、褐铁矿、菱铁矿和黄铁矿在全部自生矿物类型中所占的比例。利用自生矿物(表 7)恢复沙三段和沙四段的最大古水深分别为 67.01 m 和 18.75 m。

表 7 车西洼陷不同类型样品中全岩矿物分析组分含量 ($w_B/\%$)

Table 7 Whole-rock mineral analysed fraction contents in different types of samples from the Chexi Depression ($w_B/\%$)

层段	样品	石英	方解石	菱铁矿	赤铁矿	褐铁矿	黄铁矿
沙三段	C10	13.1	10.1	10.1	4.2	0.7	12.3
	C26	10.6	-	2.4	5	1.2	-
	M156	21.6	12.3	6.5	0.4	0.9	-
沙四段	Y96	15.3	-	0.5	7.4	-	4.3
	M236	21.5	-	3.6	10.4	10.3	-
	Y223	21.5	7.3	-	5	-	-

综上所述, 沙三段最大古水深在 54.7 ~ 67.01 m 之间, 平均为 60.07 m, 沙四段最大古水深在 16.42 ~ 25.8 m 之间, 平均为 20.32 m。以上分析表明沙三段水体相对较深, 具备重力流沉积发育的更优背景条件。

5 重力流沉积类型

通过观察车 271 井沙四段的岩心, 根据其岩石类型、沉积构造, 结合沉积物支撑机制、流变特征, 识别出一种重力流: 泥石流。观察车 273 井、车 271 井、车 141 井、车古 25 井沙三段的岩心, 根据其岩石类型、沉积构造, 结合沉积物支撑机制、流变特征, 识别出三种类型的重力流: 滑塌沉积、砂质碎屑流沉积及浊流沉积。

5.1 泥石流沉积

泥石流是由黏土碎屑、砂质碎屑和水组成的黏滞性流体与其所支撑的砾石共同组成的块体流, 在重力作用下顺坡面发生快速运动而形成的堆积体, 泥石流多发生在水上氧化环境, 沉积特征表现出“粗、红”的特点(李洪楠, 2020)。观察研究区沙四段岩心(图 6a)可知, 该沉积期沉积物具有粒径大, 分选差, 基质中泥质含量较高(一般大于 10%)且整体为块状构造的特点; 底部可见卷入的撕裂泥片, 并常为逆粒序(康逊等, 2015), 符合泥石流沉积特征。

5.2 滑塌沉积

滑塌沉积是一种连续的半固结团块状沉积物, 在一个上凹的滑动面上移动, 经历旋回运动, 引发内部结构变形的一种沉积过程(葛毓柱等,

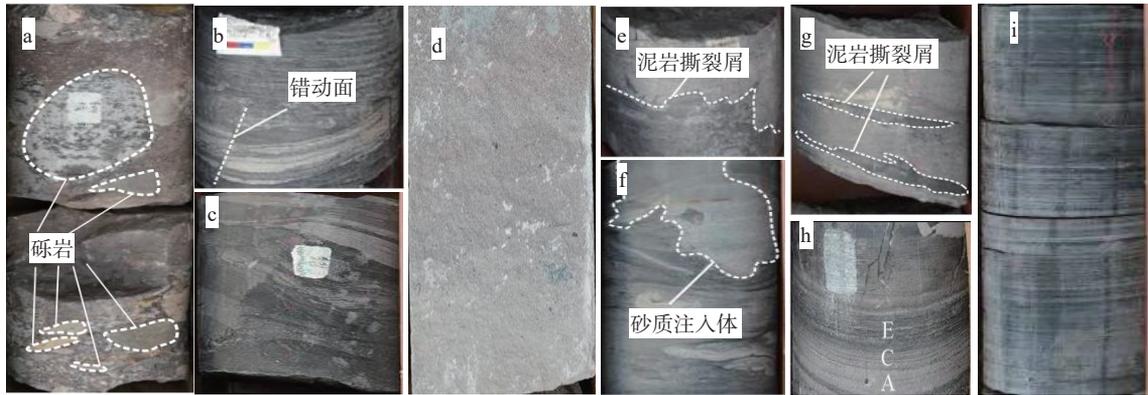


图6 车西洼陷沙三-沙四段重力流沉积特征

Fig. 6 Characteristics of gravity flow deposition in Shasan-Shasi section of Chexi Depression

2015)。研究区沙三段的岩心由于地震等原因导致重力失衡,引起地层断裂,从而产生小型错断(图6b);以及由于三角洲前缘砂体发生液化变形从而产生揉皱变形构造(图6c)。

5.3 碎屑流沉积

碎屑流是一种高浓度沉积物流,具有塑性流变性质和层流流动状态,并以整体固结的方式进行沉积(张青青等,2017)。根据其基质类型和含量,碎屑流可以分为砂质碎屑流和泥质碎屑流。砂质碎屑流主要由砂质沉积物组成,其体积浓度在25%~95%之间(于兴河等,2007);而泥质碎屑流则以泥质为主,含有丰富的砾石,其塑性流体的沉积物体积浓度在50%~90%之间(余烨等,2020)。砂质碎屑流的沉积物是呈连续性的块体状态被流体搬运,解释了深水区块状砂岩的形成。研究区沙三段岩心中可以观察到细砂沉积岩呈现不一致的厚度,形成块状层理(图6d)。这些岩石通常在与泥岩的交界处呈现突变式的顶底接触关系,显示出泥岩的撕裂屑现象(图6e),夹杂砂质注入体(图6f)。在车271井的岩心中,仅发现一处泥质碎屑流沉积的岩心,呈现出块状沉积,且不显示粒序特征。这些岩石含有大量扁平状和长条状的泥砾(图6g),可见泥岩表现出明显的撕裂现象,泥砾的长轴呈平行排列,表明泥质碎屑流具有一定的流动强度,并具有层状流动的特征。

5.4 浊流沉积

浊流是一种沉积物浓度较低、粒度较细、湍流支撑且悬浮沉降的牛顿流体(余烨等,2020)。

在岩心中可以看到不完整的鲍马序列ACE(图6h),以及代表低流态的悬浮沉积产物——粉砂纹层(图6i)。

6 重力流沉积演化模式及古气候、古环境意义

6.1 沙三段重力流沉积演化模式及古气候、古环境分析

在前人研究基础上,结合车275井、车271井、车141井和车古25井4口岩心观察井,建立了车西洼陷沙三段深水重力流沉积演化模式(图7)。车275井多见揉皱变形构造,岩性以细砂岩为主;车271井主要发育块状层理,无粒序变化,岩性主要为细砂岩;车141井主要发育泥岩撕裂屑,夹杂砂质注入体,岩性以细砂岩、粉砂岩和含粉砂泥岩为主;车古25井主要发育鲍马序列ACE段组合,岩性主要为细砂岩、泥质粉砂岩和泥岩。

深水重力流沉积形成于三角洲前缘到湖盆中心的斜坡上(Shanmugam,2013),处于斜坡之上的滑塌体不断在三角洲前缘泥岩软沉积物上堆积,沙三段沉积时期,气候温暖潮湿,降雨量丰富,入湖水流量增多,雨水携带大量沉积物形成滑塌沉积体入湖,滑塌沉积继而分离成砂质碎屑流及泥质碎屑流,砂质碎屑流底部的泥质碎屑流进一步演化形成“泥包砾”、“泥岩撕裂屑”等结构(邹才能等,2009;黄军平等,2023),进入湖平面以后,沉积物进一步稀释(杨田等,2021),流体形式由层流转化为紊流,并且由碎屑流演化为薄层浊流。

6.2 沙四段重力流沉积演化模式及古气候、古环境分析

根据岩心观察及测井曲线分析,建立了沙四段的重力流沉积演化模式(图 8)。车 271 井,多见块状层理,底部发育逆粒序。岩性以砂砾岩及砾石为主,夹杂泥质粉砂岩,砾石多为杂基支撑,分选性差,成分成熟度和结构成熟度均较低。

综上所述,沙四段沉积期,湖盆为早期裂陷

阶段,断层活动强烈,该区强烈下陷(张永辉等, 2010),湖盆处于扩张阶段,整体为干旱气候条件,物源供给不充足,水体较浅,因此重力流沉积虽然存在,但规模范围小;沙三段时期,伸展裂陷作用强烈,为裂陷阶段中期(张永辉等, 2010)。随着气候转为湿润,盆内外多处物源持续充足供给,水体较深,从而形成了典型的大型重力流沉积体。

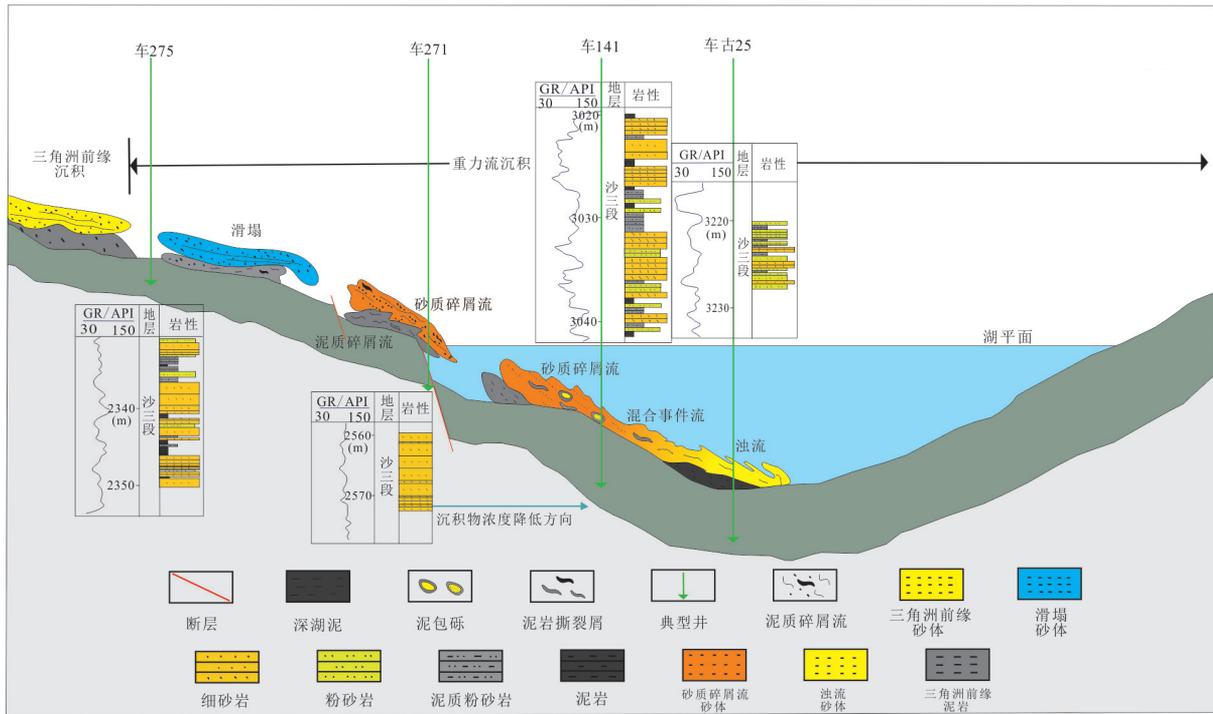


图 7 车西洼陷沙三段重力流沉积演化模式图

Fig. 7 Gravity flow evolution pattern in the Shasan section of the Chexi Depression

据张军等(2024)修编

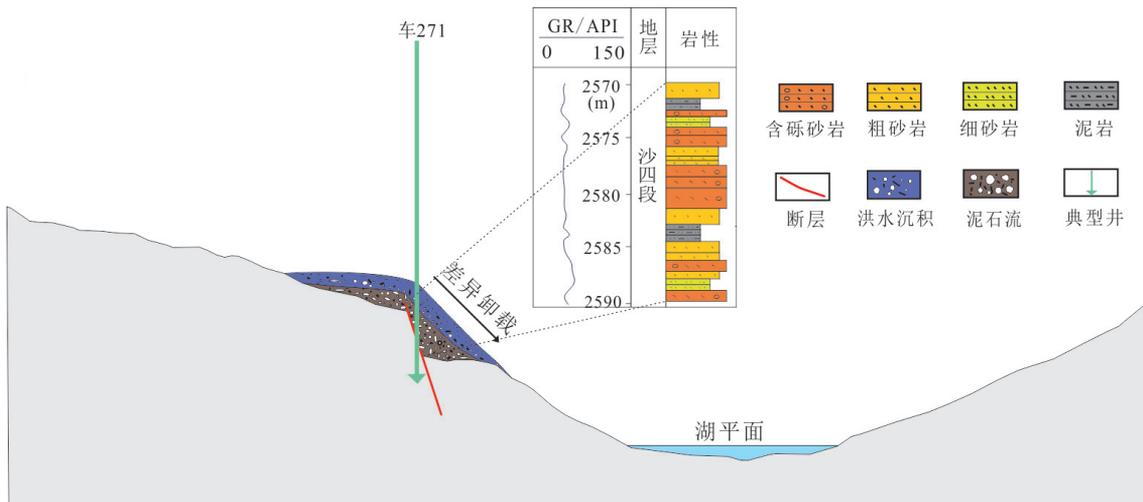


图 8 车西洼陷沙四段重力流沉积演化模式图

Fig. 8 Gravity flow evolution pattern in the Shasi section of the Chexi Depression

7 结论

(1) 车西洼陷沙三-沙四段的古气候指数 C 以及 Fe/Mn 指标均指示沙四段沉积期气候干燥, 沙三段沉积期整体较沙四段沉积期湿度增大, 主要为半湿润-湿润气候。Sr/Ba 指标指示沙四段沉积期为咸水环境, 沙三段沉积期为淡水-半咸水环境。

(2) 车西洼陷沙三-沙四段古水深分析结果显示, 沙三段最大古水深在 54.7 ~ 67.01 m 之间, 平均为 60.07 m, 处于缺氧-贫氧环境中; 沙四段最大古水深在 16.42 ~ 25.8 m 之间, 平均为 20.32 m, 沙四段沉积期水体较浅, 处于贫氧环境。

(3) 沙三段沉积时期, 气候温暖潮湿, 降雨量丰富, 入湖水流量增多, 雨水携带大量沉积物形成滑塌沉积体入湖, 滑塌沉积继而分离成砂质碎屑流及泥质碎屑流, 砂质碎屑流底部的泥质碎屑流进入湖平面以后, 沉积物进一步稀释, 流体形式由层流转化为紊流, 并且由碎屑流演化为薄层浊流。沙四段沉积期气候干燥, 相对易于爆发洪水, 然而由于该时期湖平面相对较低, 重力流相对不发育, 仅发育了泥石流一种重力流沉积。

参考文献:

陈亮, 甘华军, 祝春荣, 田继军. 2002. 北部湾盆地涠西南凹陷沉降史研究 [J]. 新疆石油学院学报, (4): 12-17.

杜庆祥, 郭少斌, 沈晓丽, 曹中宏, 张晓龙, 李媛姝. 2016. 渤海湾盆地南堡凹陷南部古近系沙河街组一段古水体特征 [J]. 古地理学报, 18(2): 173-183.

付金华, 李士祥, 徐黎明, 牛小兵. 2018. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长 7 段古沉积环境恢复及意义 [J]. 石油勘探与开发, 45(6): 936-946.

葛毓柱, 钟建华, 樊晓芳, 任启强, 邵珠福. 2015. 山东灵山岛滑塌体内部沉积及构造特征研究 [J]. 地质论评, 61(3): 634-644.

韩敏, 操应长, 王艳忠, 刘晖, 李永新. 2009. 车镇凹陷古近系沙四段—沙三段下亚段沉积相 [J]. 油气地质与采收率, 16(5): 16-18+22+112.

黄军平, 杨田, 张艳, 李相博, 董岐石, 杨占龙, Guilherme Bozetti, 郑泽宇. 2023. 湖相细粒沉积岩沉积动力学机制与沉积模式——以鄂尔多斯盆地铜川地区延长组长

7 油层组露头为例 [J]. 沉积学报, 41(4): 1227-1239.

康逊, 靳军, 胡文瑄, 杨召, 曹剑, 吴海光. 2015. 重力流研究评述及玛湖斜坡区百口泉组重力流类型 [J]. 新疆石油地质, 36(3): 369-378.

康玉柱, 张金亮, 徐耀辉, 李阳. 2023. 多物源体系下砂砾岩储层差异性孔隙演化模式——以车镇凹陷沙三段、沙四段为例 [J]. 长江大学学报 (自然科学版), 20(5): 1-20.

蓝先洪, 马道修, 徐明广, 周清伟, 张光威. 1987. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, (1): 39-49.

李洪楠. 2020. 断陷湖盆陡坡带重力流沉积特征及模式——以辽河西部凹陷兴马地区沙三段为例 [J]. 石油地质与工程, 34(4): 12-18.

李茹. 2008. 车西地区古潜山储层裂缝系统形成机理与有利储层预测 [D]. 中国石油大学 (华东) 博士学位论文.

茆书巍, 郝雪峰, 巩建强, 张鹏飞. 2021. 东营凹陷民丰地区沙四段古水体量化恢复及其地质意义 [J]. 地质论评, 67(S1): 105-106.

孙彩蓉. 2017. 鄂尔多斯盆地东缘石炭—二叠系页岩沉积相及微量元素地球化学研究 [D]. 中国地质大学 (北京) 硕士学位论文.

孙际茂, 娄亚利, 高利军, 鲍振襄. 2007. 中前寒武系金矿地质及相关成矿问题探讨 [J]. 地质与资源, (3): 189-195.

王健, 操应长. 2013. 干旱气候背景下陆相高频振荡性湖盆沉积作用——以东营凹陷下始新统为例 [C]. // 第一届国际古地理学会议论文集.

杨海欧, 王长城, 李文杰, 董华, 龚晓星. 2017. 基于微量元素比值分析方法研究川东南地区小河坝组沉积环境和古气候环境 [J]. 岩矿测试, 36(3): 289-296.

杨田, 操应长, 田景春. 2021. 浅谈陆相湖盆深水重力流沉积研究中的几点认识 [J]. 沉积学报, 39(1): 88-111.

杨万芹. 2018. 东营凹陷沙三下-沙四上亚段页岩岩相特征及发育规律 [D]. 中国石油大学 (华东) 博士学位论文.

于兴河, 姜辉, 施和生, 侯国伟. 2007. 珠江口盆地番禺气田沉积特征与成岩演化研究 [J]. 沉积学报, (6): 876-884.

余焯, 王莉, 尹太举, 张兴强, 黄俨然, 曹涛涛. 2020. 下刚果盆地早白垩世巴雷姆晚期深水重力流沉积的发现及意义 [J]. 古地理学报, 22(4): 620-634.

张彬, 姚益民. 2013. 利用微量元素统计分析东营凹陷新生代沙四晚期湖泊古环境 [J]. 地层学杂志, 37(2): 186-192.

张军, 白玉彬, 闫新智, 赵靖舟, 徐宁. 2024. 鄂尔多斯盆地富县地区长 7 段深水重力流沉积及勘探意义 [J/OL]. 沉积学报. <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2024.059>.

张青青, 操应长, 刘可禹, 杨田, 王艳忠, 贾光华, 刘鑫金. 2017. 东营凹陷滑塌型重力流沉积分布特征及三角

- 洲沉积对其影响[J]. 地球科学, 42(11):2025-2039.
- 张世奇,任延广. 2003. 松辽盆地中生代沉积基准面变化研究[J]. 长安大学学报(地球科学版), (2):1-5.
- 张永辉,夏斌,万念明,万志峰,施秋华,蔡嵩. 2010. 车西洼陷构造演化对油气成藏的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 34(4):593-598.
- 邹才能,冯有良,杨智,蒋文琦,张天舒,张洪,王小妮,朱吉昌,魏琪钊. 2023. 中国湖盆细粒重力流沉积作用及其对页岩油“甜点段”发育的影响[J]. 石油勘探与开发, 50(5):883-897.
- 邹才能,赵政璋,杨华,付金华,朱如凯,袁选俊,王岚. 2009. 陆相湖盆深水砂质碎屑流成因机制与分布特征——以鄂尔多斯盆地为例[J]. 沉积学报, 27(6):1065-1075.
- Clare M A, Clarke J E H, Talling P J, Cartigny M J B, Pratomio D G. 2016. Preconditioning and triggering of offshore slope failures and turbidity currents revealed by most detailed monitoring yet at a fjord-head delta[J]. Earth and Planetary Science Letters, 450: 208-220.
- Clarke J E H. 2016. First wide-angle view of channelized turbidity currents links migrating cyclic steps to flow characteristics[J]. Nature communications, 7(1): 11896.
- Galy V, France-Lanord C, Beyssac O, Faure P, Kudrass H, Palhol F. 2007. Efficient organic carbon burial in the Bengal fan sustained by the Himalayan erosional system[J]. Nature, 450(7168): 407-410.
- Huang Y T, Tan X F, Liu E T, Wang J, Wang J P. 2021. Sedimentary processes of shallow-marine turbidite fans: An example from the Huangliu Formation in the Yinggehai Basin, South China Sea[J]. Marine and Petroleum Geology, 132: 105191.
- Kane I A, Clare M A, Miramontes E, Wogelius R, Rothwell J J, Garreau P, Pohl F. 2020. Seafloor microplastic hotspots controlled by deep-sea circulation[J]. Science, 368(6495): 1140-1145.
- Kolla V, Bourges P, Urruty J M, Safa P. 2001. Evolution of deep water Tertiary sinuous channels offshore Angola(West Africa) and implications for reservoir architecture[J]. AAPG Bulletin, 85: 1371-1405.
- Mulder T, Alexander J. 2001. The physical character of subaqueous sedimentary density flows and their deposits[J]. Sedimentology, 48: 269-299.
- Okay S, Jupinet B, Lericolais G, Cifci G, Morigi C. 2011. Morphological and stratigraphic investigation of a Holocene subaqueous shelf fan, north of the Istanbul Strait in the Black Sea[J]. Turkish Journal of Earth Sciences, 20(3): 287-305.
- Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: Implications[J]. Petroleum Exploration and Development, 40(3): 316-324.
- Talling P J. 2013. Hybrid submarine flows comprising turbidity current and cohesive debris flow: Deposits, theoretical and experimental analyses, and generalized models[J]. Geosphere, 9(3): 460-488.
- Tokuhashi S. 1996. Shallow-marine turbiditic sandstones juxtaposed with deep-marine ones at the eastern margin of the Niigata Neogene backarc basin, Central Japan[J]. Sedimentary Geology, 104: 99-116.
- US Department of the Interior. 2004. Deepwater Gulf of Mexico 2004: America's expanding frontier[Z].
- Villa E, Bahamonde J R. 2001. Accumulations of Ferganites (Fusulinacea) in shallow turbidite deposits from the Carboniferous of Spain[J]. The Journal of Foraminiferal Research, 31: 173-190.
- Wang J H, Xie X N, Pang X, Liu B J. 2017. Storm-reworked shallow-marine fans in the Middle Triassic Baise area, South China[J]. Sedimentary Geology, 349: 33-45.
- Weimer P, Slatt R M. 2004. Petroleum systems of deep water settings[M]. Tulsa, USA: Society of Exploration Geophysicists and European Association of Geoscientists and Engineers.
- Yang R C, Jin Z J, Van Loon A J, Han Z Z, Fan A P. 2017. Climatic and tectonic controls of lacustrine hyperpycnite origination in the Late Triassic Ordos Basin, central China: Implications for unconventional petroleum development[J]. AAPG Bulletin, 101(1): 95-117.
- Yang T, Cao Y C, Wang Y Z, Li Y, Zhang S M. 2015. Status and trends in research on deep - water gravity flow deposits[J]. Acta Geologica Sinica, 89(2): 610-631.