

引用格式:程浩,金振奎,余文端,等.苏北盆地溱潼凹陷阜三段浅水三角洲沉积古地貌、古环境恢复[J].油气藏评价与开发,2023,13(3):368-378.

CHENG Hao, JIN Zhenkui, YU Wenduan, et al. Sedimentary palaeogeomorphology and palaeo-environment reconstructions of shallow water delta in the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(3): 368-378.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2023.03.012

苏北盆地溱潼凹陷阜三段浅水三角洲沉积古地貌、古环境恢复

程浩^{1,2},金振奎^{1,2},余文端³,郇浩³,王金艺^{1,2},朱小二^{1,2},苏刚⁴

(1. 中国石油大学(北京)地球科学学院,北京 102249;2. 油气资源与探测国家重点实验室,北京 102249;

3. 中国石化华东油气分公司,江苏南京 210019;4. 中国石油渤海钻探公司,河北廊坊 065000)

摘要:古地貌、古环境条件是影响沉积的主要外部因素,苏北盆地溱潼凹陷阜三段浅水缓坡三角洲由于水体变化频繁、地形复杂、地震识别追踪难度高,对其古地貌与古环境恢复研究仍较为欠缺,影响对研究区整体勘探评价。为明确溱潼凹陷阜三段沉积时期的古地貌及古环境条件,通过对地层岩心、测井资料、岩石物性资料进行综合分析,结合古地质图、印模法、残余厚度法等对阜三段沉积时期古地貌进行半定量恢复并优选2口井33个岩石样品的热解实验数据、TOC(总有机碳含量)及微量元素含量数据进行古环境恢复分析。据此绘制溱潼凹陷阜三段古地貌恢复图及古环境变化曲线,证明研究区阜三段是南低北高、东西收敛的箕状凹陷,沉积时期气候温暖潮湿,水体活动频繁往复,湖水盐度低,多物源多期次间歇供给,物源输入持续增多,沉积速率较快。明确了研究区地层物性参数与古地貌,地球化学参数与古环境的对应关系,从而为进一步勘探开发提供参考。

关键词:古地貌恢复;微量元素分析;古环境恢复;阜三段;溱潼凹陷

中图分类号:TE111

文献标识码:A

Sedimentary palaeogeomorphology and palaeo-environment reconstruction of shallow water delta in the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

CHENG Hao^{1,2}, JIN Zhenkui^{1,2}, YU Wenduan³, TAI Hao³, WANG Jinyi^{1,2}, ZHU Xia'er^{1,2}, SU Gang⁴

(1. College of Geosciences, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China; 2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, Beijing 102249, China; 3. Sinopec East China Oil & Gas Company, Nanjing, Jiangsu 210019, China;

4. CNPC Bohai Drilling Engineering Company Limited, Langfang, Hebei 065000, China)

Abstract: Palaeogeomorphology and palaeo-environment conditions are the main environmental factors affecting the sedimentation. Due to the frequent water change, complex terrain and high difficulty in seismic identification and tracking, the reconstruction research of palaeogeomorphology and palaeo-environment in the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag of Subei Basin is still insufficient, which affects the overall exploration evaluation of the study area. In order to clarify the palaeogeomorphology and palaeo-environmental conditions of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag during the deposition period, the formation core, logging data and rock material data are comprehensively analyzed. The semi-quantitative reconstruction of the palaeogeomorphology of the 3rd member of Funing Formation is carried out by combining the palaeo-geologic map, impression method and residual thickness method, and the pyrolysis experiment data, TOC and trace element content data of 33 rock samples from two wells are selected to carry out the palaeo-environment reconstruction analysis. Accordingly, paleogeomorphology reconstruction in map form and the curves of palaeo-environment changes of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag are drawn, which prove that the study area is a half-graben, lower in the South and higher in the North with the convergence across

收稿日期:2021-07-05。

第一作者简介:程浩(1993—),男,在读博士研究生,主要从事沉积学方面的研究。地址:北京市昌平区府学路18号,邮政编码:102249。

E-mail:chenghao12134@163.com

基金项目:国家科技重大专项“陆相层系页岩气勘探潜力评价”(2017ZX05036-004);国家自然科学基金“上扬子地区中二叠统白云岩分布规律及形成机理”(41872018);中国石化华东分公司课题项目“溱潼凹陷阜三段沉积微相精细研究”(HX20191190)。

the east-west direction, the climate is warm and humid during the sedimentary period, the water body activity is frequent and recurrent, the water salinity is low, the multiple source is supplied intermittent, the material source input continues to increase, and the deposition rate is fast. Therefore, the corresponding relationship between stratigraphic physical parameters and paleogeomorphology, geochemical parameters and paleoenvironment in the study area are clarified, which provide reference for the further exploration and development.

Keywords: palaeogeomorphology reconstruction; trace element analysis; palaeo-environment reconstructions; the 3rd member of Funing Formation; Qintong Sag

苏北盆地溱潼凹陷阜三段主要发育浅水缓坡三角洲,以近湖岸、远物源且多期次供给为主要特征,研究区地层多以砂泥薄互层形式发育,是一个岩性—构造复合油气藏有利发育区带^[1-2]。古地貌、古构造及古水文等古环境条件是影响浅水三角洲沉积的主要外部因素,其中以古地貌与古环境最为重要^[3-4]。因此,研究该地区古地貌及古环境条件对明确研究区沉积模式具有重要意义。

目前,对于溱潼凹陷阜三段砂体沉积与储层发育方面已经进行了大量的工作并获得较多成果,对溱潼凹陷沉积相、沉积特征、油藏描述及油气富集规律等^[1,5-7]已取得较为深刻的认识,但由于研究区水体变化频繁、地震识别追踪难度高,对其古地貌与古环境恢复研究仍较为欠缺,影响对研究区整体勘探评价。因此,在前人研究基础上,结合岩石测井资料、物性资料、TOC(总有机碳含量)测试、岩石热解及微量元素分析实验数据,利用一系列计算分析方法,对研究区阜三段沉积古地貌及古环境进行半定量和定性恢复,旨在明确阜三段浅水三角洲发育时期古地貌与古环境条件,为溱潼凹陷阜三段地层下一步勘探开发部署工作提供参考与理论依据。

1 区域地质概况

1.1 地质概况

苏北盆地位于江苏省东北部,属于苏北—黄海盆地,面积约为35 000 km²。溱潼凹陷位于苏北盆地东南部,面积约1 004.8 km²,属于东台坳陷次级构造单元。东临泰州凸起,西临吴堡低凸起,梁垛低凸起相邻与小海凸起相邻,发育有利的生储盖组合,是苏北盆地油气最富集的凹陷之一(图1a)^[8]。古新世与始新世地层是研究区主要勘探开发层段,自下而上发育泰州组、阜宁组、戴南组及三垛组(图1b)。其中,阜三段是主力油层,主要发育浅水缓坡三角洲沉积,水位变化频繁^[9]。以大规模湖泛面泥质沉积为界

限将阜三段地层划分为4个砂组^[5],其中阜三段2小层段是一个全区稳定的相对较厚的“泥脖子”层段,对应了一次稳定的大规模的湖侵活动,岩性主要为深灰色泥页岩;阜三段1、2、3小层对应水位变化频繁阶段,砂泥多以互层形式存在,岩性多为灰色泥质粉砂岩、细砂岩及灰色泥岩,是本文主要的研究层段^[10]。

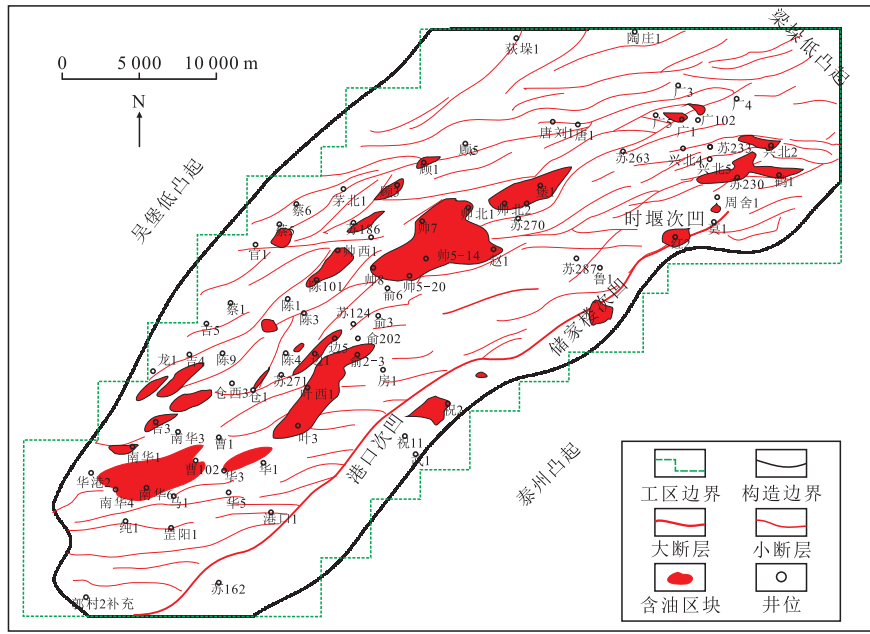
1.2 岩性特征

通过对研究区地层样品的X衍射全岩分析和黏土矿物分析,溱潼凹陷阜三段砂质地层以含泥石英杂砂岩为主,粒级为粉砂—中砂。其中,黏土矿物、石英、钾长石、斜长石含量平均值分别为20.35%、48.31%、6.0%、16.13%;黏土矿物以伊蒙混层为主,平均含量达45.19%,伊利石、高岭石、绿泥石平均含量分别为10.64%、21.02%、20.26%。

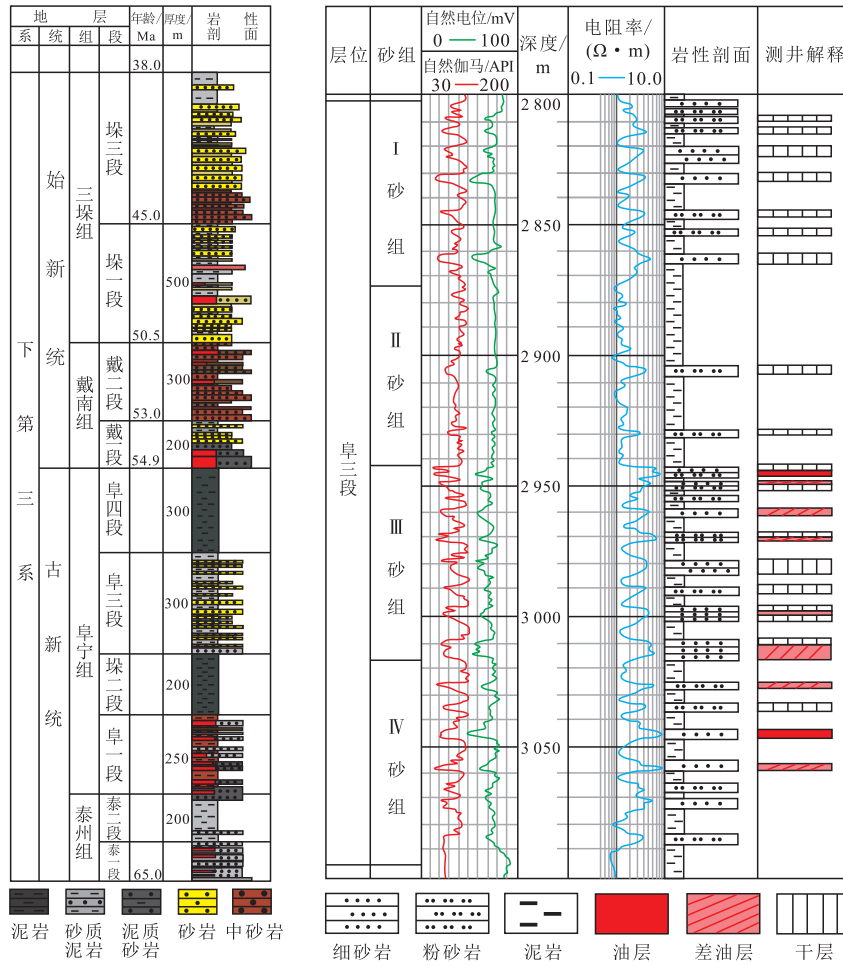
溱潼凹陷阜三段地层孔隙发育较差,多发育微小孔,主要有晶间微孔、粒内孔、粒间孔及微裂缝4种孔隙类型:晶间微孔一般发育在高岭石等黏土矿物之间,孔径小于50 μm,连通性差(图2a、图2b);粒内孔包括粒内溶孔和铸模孔,是由于颗粒间或颗粒内部经过溶蚀作用形成的孔洞,孔径约50 μm,连通性一般(图2c、图2d);粒间孔是颗粒间相互支撑形成的连续空间,孔径50~200 μm(图2e),孔隙连通性好,分布广泛,是岩石主要的储集空间类型;裂缝分布范围小,宽度窄且延伸短(图2f)。

2 古地貌恢复

目前,古地貌恢复研究在国内外已得到广泛应用,一般为定性—半定量恢复,较常用的方法有古地质图法、印模法、残余厚度法及层序地层学法等^[11-15]。针对溱潼凹陷阜三段地层特征与现有资料条件,参考古地质特征,以填平补齐为原则,采用印模—残余厚度结合法,相互修正以统计沉积厚度,对研究区古地貌进行半定量恢复。



a. 溱潼凹陷构造位置及含油气情况



b. 阜三段地层岩性柱状图

图1 苏北盆地溱潼凹陷构造位置及岩性特征

Fig. 1 Structure position and lithologic characteristics of Qintong Sag, Subei Basin

最南端地层缺失尤为严重,阜三段在整个研究区均有稳定沉积,地层缺失段存在明显风化痕迹,说明此处后期经历过剥蚀;凹陷西南部地层完整无任何剥蚀痕迹,地层稳定未发生大规模剥蚀;凹陷西斜坡的南北两侧阜三段1小层部分缺失,中部无地层缺失现象。通过以上证据大致可以推断溱潼凹陷阜三段古地形是一个南低北高、中部低洼的凹陷。

2.2 印模-残余厚度法

印模法与残余厚度法作为古地貌恢复最广泛有效的2种手段,均可对地层古地貌进行恢复与表征。印模法通过对顶层拉平并对地层古厚度进行压实恢复,以此恢复古地貌^[16];残余厚度法是根据地层残余厚度,求取地层真厚度、剥蚀量恢复等步骤,来反映地层原始厚度及形态^[17]。但单一研究方法易发生地层穿时穿层、剥蚀量无法定量等问题。因此,以印模法为主,结合古地质图法与残余厚度法,对地层残余厚度统计、压实量、剥蚀量恢复等问题综合研究,最终获得目标层古地貌特征。

2.2.1 标准层选取与残余厚度统计

溱潼凹陷阜三段2小层泥质沉积对应了一次大规模的湖侵活动,泥质沉积稳定分布广,其与下覆的阜三段3、4小层在地质历史中未发生明显地层剥蚀,可忽略剥蚀作用对地层厚度计算结果的影响,遵循全区广泛稳定分布、与风化壳层距离较近并且地层需易于识别三大原则^[18-19]。因此,将阜三段2小层顶作为古地貌恢复的标准层,将其顶面作为填平补齐面,将阜三段底部作为地层底面分别进行顶、底拉平(图4),从而判断地层压实差异性 & 古地貌展布特征^[20-21],为进一步的地层厚度定量恢复、古地貌精细刻画工作提供参考。

由图4a可知,地层厚度由北至南总体上呈逐渐增厚的趋势,阜三段4小层地层厚度变化不大,阜三段2、3小层地层由北往南逐渐增厚;垂物源方向地层厚度变化较为平缓(图4b),各个砂组横向厚度变化不明显,地层厚度整体上为东高西低的特征,说明溱潼凹陷阜三段大致上为一个北高南低、西高东低,中部开阔平坦的凹陷地形,与古地质图法分析结果一致。

2.2.2 原始孔隙度定量恢复

该文将研究区地层分为以中—细砂岩为主的优

质储层、以细—粉砂岩为主的一般储层以及泥岩这3大类利用单井资料与测井资料来统计地层残余厚度,得到目的层各个岩石类型的残余厚度。

原始孔隙度定量恢复是地层厚度压实校正的重要环节,目前主要有粒度法与分选系数法2种计算方法:

1) 粒度法: Beard和Weyl假定自然界的砂是随机堆积的,在潮湿的地表条件下建立了孔隙度 φ 和分选系数 S_0 的关系^[22]:

$$\varphi = 20.91 + \frac{22.90}{S_0} \quad (1)$$

式中:分选系数采用克拉斯克定义,但粒度法过于依赖物性参数且计算结果仅限于地区性应用,无法大范围推广使用;

2) 分选系数法:将天然水环境下沉积颗粒近似视为球形,颗粒只受重力与浮力作用,沉积颗粒在2种作用共同作用下达到稳定状态时的堆叠形态近似于菱形,此时颗粒体积 V 与表面积 S 存在以下数量关系^[23]:

$$\frac{S}{V} = \sum_{n_{\min}}^{n_{\max}} \frac{4\pi n_i R_i^2}{(4/3)n_i \pi R_i^3} \quad (2)$$

式中: R_i 为粒径,单位mm; n 为颗粒数。

假设沉积物中只含有一种粒径 R_a 的颗粒,颗粒数为 n (n 为与伽马曲线拟合的主要粒度区间上下限计算结果乘积的平方根),若取体积为1的岩石,其孔隙度为 φ ,粒径为 R_a ,则式(2)可简化为式(3):

$$1 - \varphi = n \frac{4}{3} \pi R_a^3 \quad (3)$$

其中表面积为:

$$S = n 4\pi R_a^2 = 4\pi \left[\frac{(1 - \varphi)^3}{4n\pi} \right]^{\frac{2}{3}} \quad (4)$$

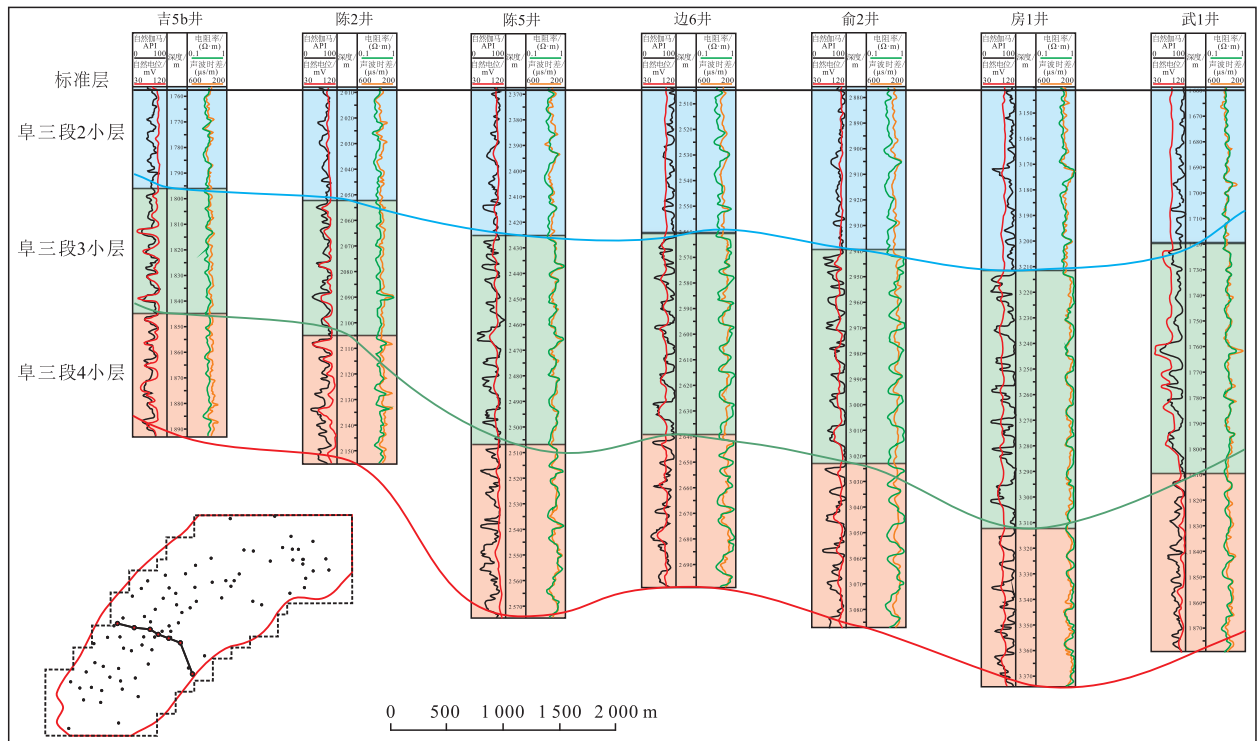
当粒度和颗粒数量同时变化时,沉积物的体积与表面积比值趋于一个定值:

$$\lim_{\substack{n_{\max} \\ n_{\min}}} \sum \frac{4\pi n_i R_i^2}{\frac{4}{3} n_i \pi R_i^3} = \left(\frac{1}{2} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (5)$$

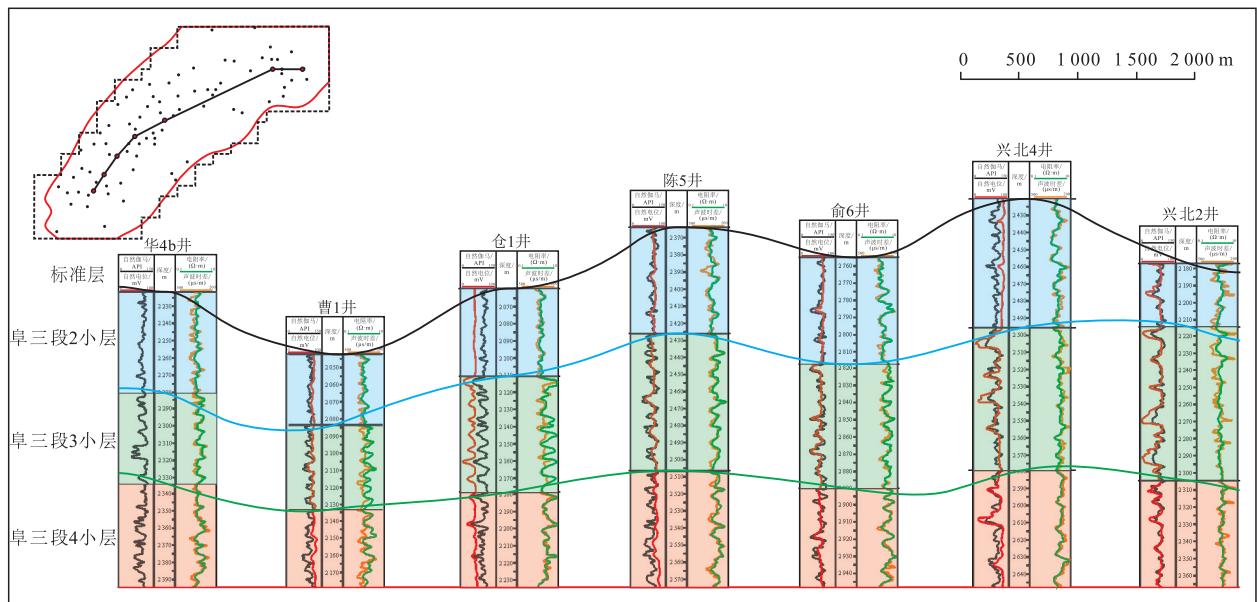
综合式(3)一式(5)可得:

$$\varphi = \left(1 - \frac{4\pi n R_a^2}{3} \right) / \sqrt[6]{8} \quad (6)$$

通过以上2种计算方法对溱潼凹陷阜三段地层原始孔隙度进行综合计算(表2),恢复出地层平均孔隙度(表3)。



a. 溱潼凹陷顺物源方向地层厚度顶拉剖面



b. 溱潼凹陷垂物源方向地层厚度底拉剖面

图4 苏北盆地溱潼凹陷阜三段地层厚度剖面

Fig. 4 Stratatum thickness profile of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

2.3 地层古地貌恢复

对地层岩石平均孔隙度进行统计与恢复,计算得出地层压实率并推广至全地区(表4),对统计的地层残余厚度进行古厚度定量恢复并以此表征古地貌特征。

通过以上方法所得出的多种恢复结果相互纠正相互补充,对溱潼凹陷阜三段古地貌进行准确精细描述,最终得出溱潼凹陷阜三段古地貌三维恢复(图5),表明了溱潼凹陷是一个南低北高、中部开阔、东西收敛的箕状凹陷。总的说来,各砂组沉积前的古地貌

表2 苏北盆地溱潼凹陷阜三段地层平均孔隙度
Table 2 Average porosity of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

层位	地层平均孔隙度/%		
	中砂岩	细—粉砂岩	泥岩
阜三段2小层	22.98	14.87	6.64
阜三段3小层	24.94	15.60	7.86
阜三段4小层	27.90	15.95	6.99

表3 苏北盆地溱潼凹陷阜三段地层恢复平均孔隙度
Table 3 Average porosity of the 3rd member of Funing Formation after reconstruction in Qintong Sag, Subei Basin

层位	地层恢复平均孔隙度/%		
	中砂岩	细—粉砂岩	泥岩
阜三段2小层	30.79	33.55	27.34
阜三段3小层	32.79	34.87	31.24
阜三段4小层	34.36	35.36	30.02

表4 苏北盆地溱潼凹陷阜三段地层平均压实率
Table 4 Average compaction rate of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

层位	地层压实率/%		
	中砂岩	细—粉砂岩	泥岩
阜三段2小层	25.37	56.68	75.71
阜三段3小层	23.95	55.26	74.84
阜三段4小层	18.80	54.89	76.72

总体相似,具有一定继承性。凹陷西南部地层厚度最小,为第一台阶,近南北走向;中部地层厚度中等,为第二台阶,近南北走向;东北部厚度中等,也为第二台阶,近东西走向;中北部深凹带,地层厚度最大。古地形的走向与现今隆凹构造走向有差异,现今构造总体上是西北高东南低,呈北东走向。

3 古环境恢复

古环境恢复对于认识地层发育特征及沉积模式也有重要意义。目前,对古环境的恢复仍为定性恢复,主要研究方法是通过地层各种物化参数进行对比研究^[24],总结出能表征古环境变化特征的参数关系,并作为判别标准在全区地层进行检验。

3.1 样品与实验

该次实验选用了溱潼凹陷阜三段西斜坡与北斜

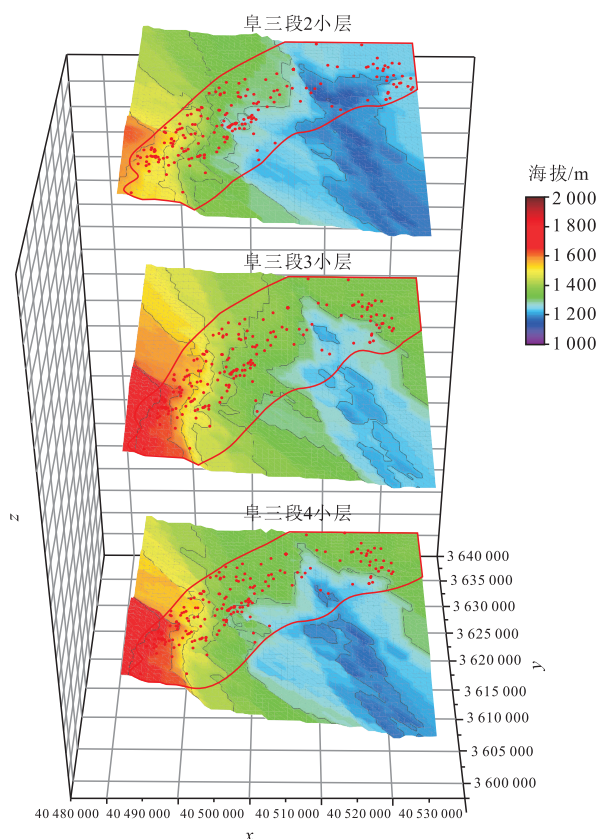


图5 苏北盆地溱潼凹陷阜三段古地貌恢复
Fig. 5 Reconstruction of paleogeomorphology of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

坡最具代表性的南华201井与广7井3段地层的30余块岩石样品进行了岩石总有机碳含量(TOC)实验、岩石热解实验及微量元素(ICP-MS)分析实验(表5)。

实验采用的岩石热解仪ROCK EVAL 6,最高热解温度800 °C,升温速率为25 °C/min,岩石热解及总有机碳分析严格依据国家标准《岩石热解分析:GB/T 18602—2012》《沉积岩中总有机碳的测定:GB/T 19145—2003》,标准物质的研制依据国家计量技术规范《一级标准物质技术规范:JJF 1006—1994》《标准物质定值的通用原则及统计学原理:JJF 1343—2012》。

元素分析试验样品HF + HNO₃混合酸预处理后,采用Thermo fisher VG—X7型电感耦合等离子质谱仪(ICP—MS)进行微量元素测试。在微量元素测试过程中,采用质量分数为1×10⁻⁹的Rh及Re元素作为内标,监控仪器的稳定性,在分析过程中,使用国际标准(GSR—5、GSR—6、GSD—9)及空白样品进行监测。

以上所有实验的预处理及测试均在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。实

表5 苏北盆地溱潼凹陷阜三段地层样品分析化验数据
Table 5 Analysis and test data of formation samples of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

井名	序号	深度/ m	有机碳/%	岩石热解/10 ⁻³		微量元素含量/10 ⁻⁶									
			TOC	S1	S2	V	Ni	Ga	Cu	Sr	Ba	Th	U	La	Yb
南 华 201 井	1	1758.96	0.69	0.07	0.35	74.9	27.6	25.3	19.9	208	525	14.0	2.7	52.0	3.5
	2	1759.27	1.01	0.05	0.42	81.0	40.6	28.3	27.3	221	493	15.8	2.4	55.7	4.0
	3	1759.44	1.14	0.09	0.41	91.8	37.6	30.4	26.7	188	460	15.8	2.6	60.2	4.3
	4	1759.61	0.83	0.17	0.38	57.2	34.8	25.1	20.4	195	540	14.1	2.6	56.1	3.6
	5	1759.78	0.99	0.05	0.37	80.8	39.0	17.6	23.2	233	523	17.6	2.9	50.0	3.3
	6	1759.95	1.25	0.06	0.51	53.9	31.6	19.1	21.7	191	472	13.8	2.3	53.6	3.4
	7	1760.15	1.10	0.25	0.52	97.3	43.0	21.4	28.3	234	580	18.0	3.1	55.9	3.5
	8	1760.36	1.02	0.49	0.62	85.5	45.5	19.3	27.8	215	523	17.3	3.0	51.6	3.2
	9	1760.57	1.05	0.28	0.48	82.1	53.4	20.2	33.1	227	529	17.7	3.4	55.4	3.6
	10	1761.01	0.96	0.07	0.36	84.1	37.1	17.4	24.1	190	478	15.6	2.4	53.7	3.1
	11	1761.20	0.97	0.10	0.37	104.0	47.6	20.8	30.6	241	488	17.8	2.9	57.2	3.4
	12	1761.37	1.07	0.07	0.49	86.6	50.5	24.6	32.1	223	526	19.1	3.1	54.7	3.8
	13	1761.54	0.92	0.13	0.35	74.3	42.4	22.5	26.5	229	452	15.6	2.2	58.3	3.5
	14	1761.71	1.00	0.03	0.36	66.1	34.5	23.7	23.6	183	432	16.2	2.4	57.6	3.5
	15	1761.91	1.03	0.04	0.42	90.2	37.3	19.2	25.7	218	478	16.4	2.7	53.4	3.5
	16	1796.94	0.67	0.04	0.23	96.4	36.8	18.8	17.5	233	414	8.8	2.0	51.9	3.5
	17	1798.55	0.75	0.04	0.27	92.5	26.4	23.6	27.9	229	477	14.1	2.2	57.5	3.7
	18	1798.57	0.66	0.04	0.22	113.0	31.3	24.4	26.1	241	462	15.7	2.8	51.7	3.8
	19	1798.62	0.38	0.03	0.18	101.0	56.8	22.4	27.0	222	726	10.0	2.6	64.2	3.9
	20	1798.67	0.38	0.03	0.16	82.6	30.1	20.3	21.8	239	578	11.1	2.0	53.8	3.2
	21	1798.73	0.47	0.03	0.24	78.5	33.3	16.8	19.6	237	573	10.3	2.8	52.6	3.6
	22	1798.78	0.58	0.04	0.19	75.3	32.0	19.8	24.7	224	534	11.0	2.1	60.2	3.7
广 7 井	23	2013.22	1.89	1.81	7.59	73.4	111.0	16.5	36.5	222	561	10.3	2.3	47.2	2.5
	24	2013.79	0.68	0.04	0.25	89.4	32.8	23.8	23.9	207	477	15.6	2.2	48.7	3.1
	25	2013.98	1.34	0.29	0.94	103.0	60.5	19.5	44.5	177	417	13.3	2.2	51.9	2.6
	26	2014.30	0.83	0.07	0.40	84.0	46.4	21.9	23.7	203	453	12.9	1.8	50.7	2.9
	27	2014.62	0.92	0.05	0.38	94.3	70.2	13.3	35.6	211	421	13.6	2.0	45.2	2.9
	28	2014.94	0.85	0.06	0.32	80.0	52.3	15.9	23.9	185	500	13.0	2.2	42.2	3.6
	29	2015.26	0.60	0.04	0.30	93.2	46.9	22.1	27.7	209	476	12.8	2.9	49.9	3.0
	30	2015.58	1.53	0.05	0.63	104.0	44.9	16.8	31.9	198	435	14.7	2.5	52.4	3.3
	31	2015.90	0.62	0.04	0.32	82.6	26.2	19.7	21.4	197	477	12.6	2.8	55.7	3.1
	32	2017.58	0.74	0.05	0.84	94.5	26.8	12.6	17.2	315	308	7.5	2.2	77.2	4.5
	33	2017.90	0.57	0.12	0.44	91.1	27.0	11.5	16.3	202	275	7.9	1.3	35.3	2.6

验过程与数据处理均符合国际标准,相对标准偏差均在2%以下。

3.2 古环境分析

古环境变化一般会引起一系列相关元素含量发生变化。因此,该文分析了多种相关元素的对应关系并优选最能表征地层古环境特点的元素关系并与实际岩石样品进行耦合关联来建立研究区地层古环境的判别标准。

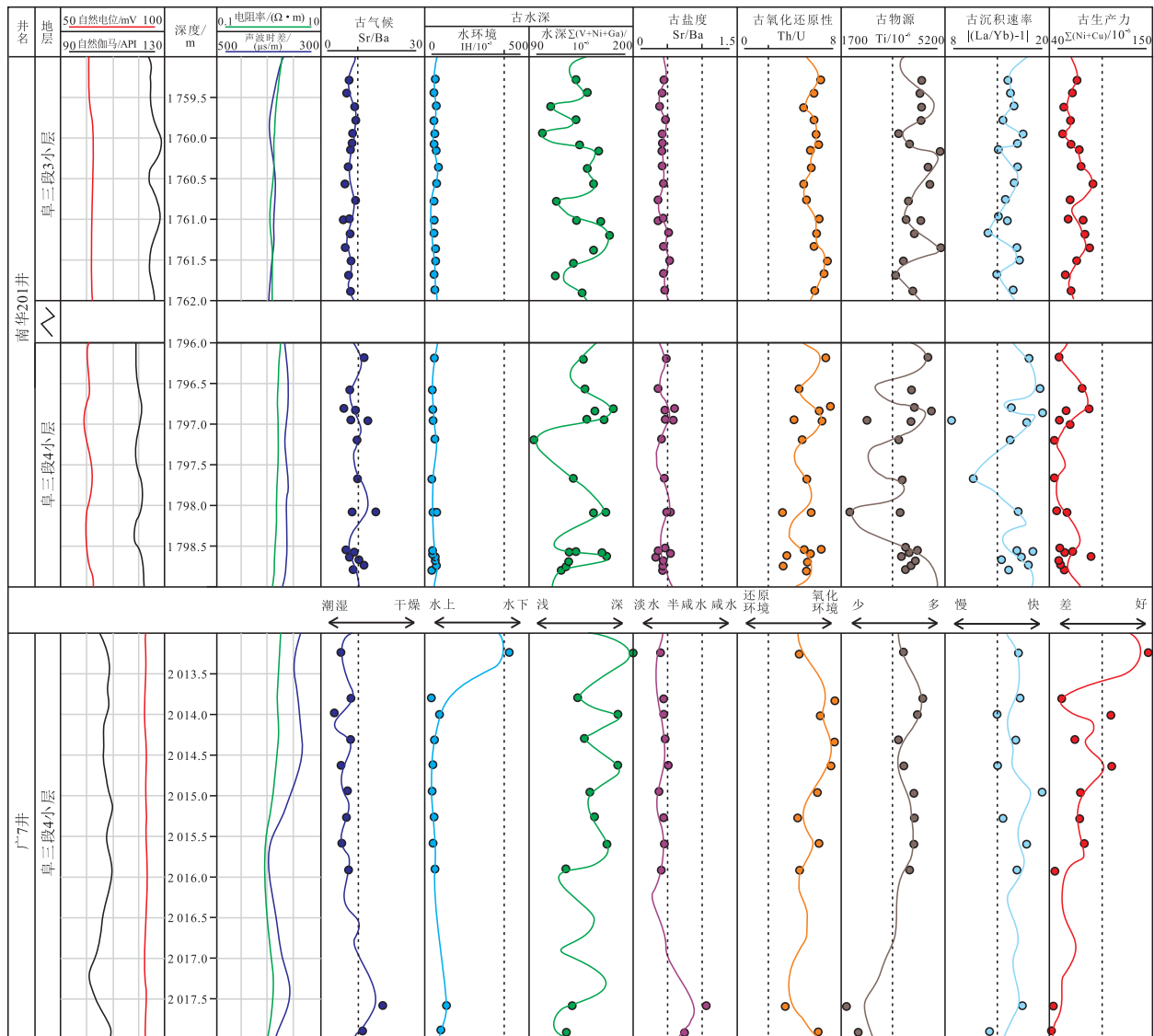
古气候、古盐度恢复:在炎热干燥的环境中水分蒸发作用强烈,溶于水中的铜(Cu)、锶(Sr)、锰(Mn)等元素随着蒸发作用的进行易发生析出,造成水体盐度升高,因此对应地层中此类元素含量升高;而在潮湿温暖的环境中,水分供给丰富,水体盐度保持低值,铝(Al)、铁(Fe)、锰(Mn)、钡(Ba)等金属元素含量相对增大。因此,在炎热干燥环境中,Fe/Mn值较低,Sr/Cu、Sr/Ba值为高值;而在温暖潮湿的环境中,Fe/Mn值较高,Sr/Cu、Sr/Ba则为低值^[25]。结合实际情

况,采用Sr/Cu、Sr/Ba的数值来表征研究区古气候与古盐度特征。通过与岩石样品的对应关系,确定古气候以Sr/Cu值10为潮湿干燥分界线,值越大,对应气候越干燥;古盐度整体上与古气候呈现一致的特征,以Sr/Ba值0.5/1.0作为淡水、淡咸水、咸水的分界点。

古氧化还原环境、古水深恢复:古气候的变化造成最直接的影响就是古水深的变化。因此,古气候的特征参数往往大体上也能表征古水深的变化。首先可用有机质类型判断地层水上水下环境,并且由于钍(Th)、铀(U)、钒(V)、铬(Cr)、镍(Ni)、铜(Cu)、锌(Zn)等元素在氧化和还原环境具有不同的化学性

质,因此,常用Th/U、V/Cr、V/(V+Ni)、Cu/Zn值来反映氧化还原环境^[26-27]。如地层处于水下还原环境中,可根据钒(V)、镍(Ni)、镓(Ga)等元素属于高度分散性元素,大多以黏土吸附方式存在,随着水深加大会产生差异性沉积的特征,以元素富集量 $\Sigma(V+Ni+Ga)$ 值来反映水深变化^[28],数值越高则对应水深越深。

古物源、沉积速率恢复:钛(Ti)元素在泥页岩中含量高且稳定性好,含量越高说明陆源物质输入越多。因此,在钛(Ti)元素在陆源物质与水体中的含量差异性可反映物源量的变化^[29-30];物源碎屑颗粒沉积过程中在水中停留时间的差异是造成稀土元素分异程度不同的主要原因之一,在水中停留时间越长,沉



注:IH为氢指数。

图6 苏北盆地溱潼凹陷阜三段古环境恢复

Fig. 6 Paleo-environment reconstruction map of the 3rd member of Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin

积速率越慢,则稀土元素分异程度越强,地层间稀土元素含量差异越大。该文采用 $I(La/Yb) - 1$ 来作为表征沉积速率大小的指标^[31],并取值14.0作为沉积速率的分界点。

3.3 古环境恢复结果

根据古环境恢复(图6),溱潼凹陷阜三段代表井阜三段3、4小层采样井段Sr/Cu小于10,属于较潮湿的古气候环境;古水深曲线与古氧化还原性曲线中,IH值均远低于450,有机质类型属于Ⅲ型, $\Sigma(V+Ni+Ga)$ 值低于 200×10^{-6} ,整段属于暴露或半暴露大气环境,Th/U数值2~8,也反映出地层处于氧化环境,说明地层绝大部分时间处于水上环境且水体动荡频繁,并且阜三段3小层水体变化频率明显比阜三段4小层更为剧烈,整体为氧化环境;古盐度Sr/Ba均在0.5左右,显示为淡水一半咸水环境且盐度变化不大。据此可推断,溱潼凹陷阜三段沉积时期气候温暖潮湿,水体活动频繁往复,其中,单次活动阜三段4小层比阜三段3小层持续时间更长范围更大,湖水盐度低。古物源曲线呈现多物源多期次间歇供给的特征,单井采样井段自下而上钛(Ti)元素含量逐渐增加,说明物源输入持续增多,但 $10 \leq I(La/Yb) - 1 \leq 20$,说明沉积速率较快,不利于有机物沉降, $\Sigma(Ni+Cu)$ ^[32]值绝大部分不高于110,并根据TOC参数得出地层有机质含量低且多为Ⅲ型,生产力较差。

4 结论

1) 溱潼凹陷阜三段3小层是一个南低北高、中部开阔、东西收敛的箕状凹陷,由南往北依次为:断阶带、深凹带、斜坡带3个构造单元。各砂组沉积前的古地貌具有一定继承性,但古地形的走向与现今隆凹构造走向有差异。

2) 溱潼凹陷阜三段3小层三角洲沉积时期气候温暖潮湿,水体盐度较低,地层绝大部分时间处于水上环境且水体活动频繁往复。古物源多物源多期次间歇供给且物源输入持续增多,但沉积速率较快,不利于有机物沉降,因此,地层有机质含量低且多为Ⅲ型,生产力较差。

3) 溱潼凹陷受地形控制形成缓坡浅水三角洲,阜三段I、Ⅲ、Ⅳ砂组沉积时期为湖平面低位振荡期。由于湖底坡度平缓,小幅度湖平面垂向升降会

导致湖岸线横向大幅度摆动,水下、水上沉积频繁交互,从而导致古环境恢复曲线的剧烈波动。说明两者具有一定相关关系,因此,明确古地貌、古环境条件对研究区优质储层预测及油气资源评价具有重要参考作用。

参考文献

- [1] 张航国, 笱灵. 苏北盆地溱潼凹陷西斜坡阜宁组三段油气富集规律[J]. 长江大学学报(自科版), 2016, 13(35): 13-17.
ZHANG Hangguo, ZAN Ling. The rules of hydrocarbon enrichment in the 3rd Member of Funing Formation on the west steep slope of Qintong Depression of Subei Basin[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2016, 13(35): 13-17.
- [2] 孙乐, 齐宇, 王波, 等. 康宁气田盒四段浅水三角洲砂体刻画及沉积演化[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 132-143.
SUN Le, QI Yu, WANG Bo, et al. Sandbody characterization and sedimentary system evolution of shallow water delta in the H4 Member of Kangning gas field[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 132-143.
- [3] 叶云涛, 王华建, 翟丽娜, 等. 新元古代重大地质事件及其与生物演化的耦合关系[J]. 沉积学报, 2017, 35(2): 203-216.
YE Yuntao, WANG Huajian, ZHAI Lina, et al. Geological events and their biological responses during the Neoproterozoic era[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(2): 203-216.
- [4] LEHMANN B, NÄGLER T F, WILLE M, et al. Highly metalliferous carbonaceous shale and early Cambrian seawater[J]. Geology, 2007, 35(5): 403-406.
- [5] 臧素华. 苏北盆地溱潼凹陷西斜坡阜三段沉积相研究[J]. 石油地质与工程, 2014, 28(6): 22-24.
ZANG Suhua. Sedimentary facies study of 3rd Member Funing Formation in western slope of Qintong Depression, Northern Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2014, 28(6): 22-24.
- [6] 任奕霖. 溱潼凹陷西斜坡阜三段砂体刻画及展布规律[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2021.
REN Yilin. Fine depiction and distribution of sand bodies of the third member of Funing Formation in west slope of Qintong Sag[D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2021.
- [7] 王黎. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组三段油藏描述[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
WANG Li. The three section of Paleogene Funing Formation reservoir description of Qintong sag of Subei Basin[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2014.
- [8] 笱灵, 骆卫峰, 印燕铃, 等. 苏北盆地溱潼凹陷古近系阜宁组二段页岩油形成条件及有利区评价[J]. 石油实验地质, 2021, 43(2): 233-241.
ZAN Ling, LUO Weifeng, YIN Yanling, et al. Formation conditions of shale oil and favorable targets in the second member of Paleogene Funing Formation in Qintong Sag, Subei Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2021, 43(2): 233-241.
- [9] 臧素华, 骆卫峰, 马晓东, 等. 苏北盆地溱潼凹陷戴一段沉积-层序特征及其对岩性勘探的指示意义[J]. 海洋地质与第

- 四纪地质, 2018, 38(3): 107-115.
- ZANG Suhua, LUO Weifeng, MA Xiaodong, et al. Depositional characteristics of the first member of Dainan formation in Qintong Sag, Subei Basin and their significance to lithological Exploration[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 107-115.
- [10] 崔敏, 张功成, 王鹏, 等. 苏北—南黄海盆地NW向断层特征及形成机制[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(6): 1332-1339.
- CUI Min, ZHANG Gongcheng, WANG Peng, et al. Characteristics and genetic mechanism of NW faults in North Jiangsu and South Yellow Sea basin[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(6): 1332-1339.
- [11] 何文军, 郑孟林, 费李莹, 等. 陆相拗陷盆地边缘沉积区古地貌恢复: 以准噶尔盆地玛湖地区三叠系百口泉组为例[J]. 古地理学报, 2019, 21(5): 803-816.
- HE Wenjun, ZHENG Menglin, FEI Liying, et al. Ancient landform restoration of marginal sedimentary area in the continental depression basin: A case study of the Triassic Baikouquan Formation in Mahu area of Junggar Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21(5): 803-816.
- [12] 王培春, 崔云江. 黏土化蚀变作用定量分析方法在储层评价中的应用——以莱州湾凹陷沙四段砂砾岩为例[J]. 中国海上油气, 2022, 34(2): 59-66.
- WANG Peichun, CUI Yunjiang. Application of quantitative analysis method of argillic alteration in reservoir evaluation: A case study of glutenite in Shahejie Formation 4 Member in Laizhouwan sag[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(2): 59-66.
- [13] 商晓飞, 赵磊, 易杰, 等. 川西新场地区须家河组二段砂体沉积充填特征及定量地质建模[J]. 中国海上油气, 2022, 34(4): 144-155.
- SHANG Xiaofei, ZHAO Lei, YI Jie, et al. Sedimentary filling characteristics and quantitative geological modeling of sand bodies in Xu2 Member of Xujiahe Formation in Xinchang area, western Sichuan Basin[J]. China Offshore Oil and Gas, 2022, 34(4): 144-155.
- [14] 闫海军, 彭先, 夏钦禹, 等. 高石梯—磨溪地区灯影组四段岩溶古地貌分布特征及其对气藏开发的指导意义[J]. 石油学报, 2020, 41(6): 658-670.
- YAN Haijun, PENG Xian, XIA Qinyu, et al. Distribution features of ancient karst landform in the fourth member of the Dengying Formation in the Gaoshiti-Moxi region and its guiding significance for gas reservoir development[J]. Acta Petroli Sinica, 2020, 41(6): 658-670.
- [15] 赵永刚, 王东旭, 冯强汉, 等. 油气田古地貌恢复方法研究进展[J]. 地球科学与环境学报, 2017, 39(4): 516-529.
- ZHAO Yonggang, WANG Dongxu, FENG Qianghan, et al. Review on palaeomorphologic reconstruction methods in oil and gas fields[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2017, 39(4): 516-529.
- [16] 刘军愕, 简晓玲, 康波, 等. 东营凹陷东营三角洲沙三段中亚段古地貌特征及其对沉积的控制[J]. 油气地质与采收率, 2014, 21(1): 20-23.
- LIU Jun'e, JIAN Xiaoling, KANG Bo, et al. Paleogeomorphology of the middle part of 3rd member of Shahejie formation and their effects on depositional systems, Dongying delta, Dongying depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2014, 21(1): 20-23.
- [17] 陈旋, 武超, 王波, 等. 台北凹陷梧桐沟组沉积期古地貌及其对沉积作用的控制[J]. 新疆石油地质, 2020, 41(6): 642-650.
- CHEN Xuan, WU Chao, WANG Bo, et al. Paleogeomorphology and its controls on sedimentation of the Permian Wutonggou Formation in Taibei Sag[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2020, 41(6): 642-650.
- [18] 付金华, 董国栋, 周新平, 等. 鄂尔多斯盆地油气地质研究进展与勘探技术[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 19-40.
- FU Jinhua, DONG Guodong, ZHOU Xinping, et al. Research progress of petroleum geology and exploration technology in Ordos Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 19-40.
- [19] 张云峰, 谭飞, 屈海洲, 等. 岩溶残丘精细刻画及控储特征分析——以塔里木盆地轮古地区奥陶系风化壳岩溶储集层为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(5): 716-726.
- ZHANG Yunfeng, TAN Fei, QU Haizhou, et al. Karst monadnock fine characterization and reservoir control analysis: A case from Ordovician weathering paleokarst reservoirs in Lungu area, Tarim Basin, NW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(5): 716-726.
- [20] 杨伟利, 王起琮, 刘佳玮, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系马家沟组标准化层序地层学研究[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(2): 234-241.
- YANG Weili, WANG Qicong, LIU Jiawei, et al. Standardization of sequence stratigraphy in Ordovician Majiagou formation, Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(2): 234-241.
- [21] 杜彦军, 贺永红, 董丽红, 等. 鄂尔多斯盆地中部长8成藏主控因素[J]. 西安科技大学学报, 2017, 37(3): 388-395.
- DU Yanjun, HE Yonghong, DONG Lihong, et al. Main control factors of tight oil reservoir in Chang 8 oil-bearing formation, central part of Ordos Basin[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2017, 37(3): 388-395.
- [22] SCHRER M. Parameters influencing porosity in sandstones: A model for sandstone porosity prediction[J]. AAPG Bulletin, 1987, 71(5): 485-491.
- [23] 杨宁, 王贵文, 赖锦, 等. 一种砂岩原始孔隙度计算方法[J]. 物探与化探, 2013, 37(4): 726-729.
- YANG Ning, WANG Guiwen, LAI Jin, et al. A method for calculating primary porosity of sandstone[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2013, 37(4): 726-729.
- [24] FATIMA S, KHAN M S. Petrographic and geochemical characteristics of Mesoproterozoic Kumbalgarh clastic rocks, NW Indian shield: Implications for provenance, tectonic setting, and crustal evolution[J]. International Geology Review, 2012, 54(10): 1113-1144.
- [25] 黄俨然, 肖正辉, 余焯, 等. 湘西北下寒武统黑色岩系元素地球化学特征及地质意义[J]. 地球化学, 2020, 49(5): 516-527.
- HUANG Yanran, XIAO Zhenghui, YU Ye, et al. Geological significance of the elemental geochemistry of lower Cambrian

- offshore oil and gas, 2017, 29(4): 1-8.
- [14] HANCOCK S H, COLLETT T S, DALLIMORE S R, et al. Overview of thermal-stimulation production-test results for the JAPEX/JNOC/GSC et al. Mallik 5L-38 gas hydrate production research well[C]// Paper presented at the 2002 Mallik International Symposium on Gas Hydrate Production Research Well Program, Makuhari, Japan, December 2003.
- [15] DALLIMORE S R, WRIGHT J F, NIXON F M, et al. Geologic and porous media factors affecting the 2007 production response characteristics of the JOGMEC/NRCan/Aurora Mallik gas hydrate production research well[C]// Paper ICGH-5829 presented at the proceedings of the 6th International Conference on Gas Hydrates, Vancouver, Canada, July 2008.
- [16] RUTQVIST J, MORIDIS G J, GROVER T, et al. Geomechanical response of permafrost-associated hydrate deposits to depressurization-induced gas production[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2009, 67(1-2): 1-12.
- [17] KURIHARA M, FUNATSU K. Analysis of Production Data for 2007/2008 Mallik gas hydrate production tests in Canada[C]// Paper SPE-132155-MS presented at the International Oil and Gas Conference and Exhibition in China, Beijing, China, June 2010.
- [18] LI J F, YE J L, QIN X W, et al. The first offshore natural gas hydrate production test in South China Sea[J]. *China Geology*, 2018, 1(1): 5-16.
- [19] YE J L, QIN X W, XIE W W, et al. The second natural gas hydrate production test in the South China Sea[J]. *China Geology*, 2020, 3(2): 197-209.
- [20] KURIHARA M, SATO A, FUNATSU K, et al. Analysis of formation pressure test results in the Mount Elbert methane hydrate reservoir through numerical simulation[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2011, 28(2): 502-516.
- [21] 苏正, 何勇, 吴能友. 南海北部神狐海域天然气水合物热激发开采潜力的数值模拟分析[J]. *热带海洋学报*, 2012, 31(5): 74-82.
- SU Zheng, HE Yong, WU Nengyou. Numerical simulation on production potential of hydrate deposits by thermal stimulation[J]. *Journal of Tropical Oceanography*. 2012, 31(5): 74-82.
- [22] BOSWELL R, MYSHAKIN E M, MORIDIS G J, et al. India National Gas Hydrate Program Expedition 02 summary of scientific results: Numerical simulation of reservoir response to depressurization[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2019, 108: 154-166.

(编辑 郭群)

(上接第378页)

- black shales from Northwestern Hunan[J]. *Geochimica*, 2020, 49(5): 516-527.
- [26] 李艳芳, 邵德勇, 吕海刚, 等. 四川盆地五峰组-龙马溪组海相页岩元素地球化学特征与有机质富集的关系[J]. *石油学报*, 2015, 26(12): 1470-1483.
- LI Yanfang, SHAO Deyong, LYU Haigang, et al. A relationship between elemental geochemical characteristics and organic matter enrichment in marine shale of Wufeng Formation-Longmaxi Formation, Sichuan Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 26(12): 1470-1483.
- [27] CHANG S Q, LONG W Q, YING C C, et al. Sedimentary environment and the controlling factors of organic-rich rocks in the Lucaogou Formation of the Jimusar Sag, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Science*, 2019, 16(4): 763-775.
- [28] 程浩, 王起琮, 杨奕华, 等. R-Q因子分析在海相石灰岩相识别中的应用——以塔里木盆地巴楚-塔中地区奥陶系石灰岩为例[J]. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 35(4): 1-10.
- CHENG Hao, WANG Qicong, YANG Yihua, et al. Application of R-Q factor analysis in lithofacies identification of marine limestone: Taking the Ordovician limestone in Bachu-Tazhong area of Tarim Basin as an example[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition)*, 2020, 35(4): 1-10.
- [29] 刘惠民, 王勇, 杨永红, 等. 东营凹陷细粒混积岩发育环境及其岩相组合: 以沙四上亚段泥页岩细粒沉积为例[J]. *地球科学*, 2020, 45(10): 3543-3555.
- LIU Huimin, WANG Yong, YANG Yonghong, et al. Sedimentary environment and lithofacies of fine-grained hybrid sedimentary in Dongying Sag: A case of fine-grained sedimentary system of the Es₄[J]. *Earth Science*, 2020, 45(10): 3543-3555.
- [30] 朱明, 施辉, 袁波, 等. 淮南四棵树一凹陷沉积古环境与物源研究——来自侏罗系一下白垩统元素地球化学的指示[J]. *沉积学报*, 2022, 40(4): 1122-1136.
- ZHU Ming, SHI Hui, YUAN Bo, et al. Palaeoenvironment and provenance of the Sikeshu Sag in the Junggar Basin: Indications from element geochemical records[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(4): 1122-1136.
- [31] 毛瑞勇, 张杰, 冷济高, 等. 岑巩页岩气区块牛蹄塘组黑色页岩稀土元素地球化学特征及沉积环境分析[J]. *矿物岩石*, 2016, 36(4): 66-73.
- MAO Ruiyong, ZHANG Jie, LENG Jigao, et al. Geochemical characteristics of rare earth elements and depositional environments of the Niutitang Formation black shale in Cengong Shale Gas Block[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2016, 36(4): 66-73.
- [32] 夏威, 于炳松, 孙梦迪. 渝东南YK1井下寒武统牛蹄塘组底部黑色页岩沉积环境及有机质富集机制[J]. *矿物岩石*, 2015, 35(2): 70-80.
- XIA Wei, YU Bingsong, SUN Mengdi. Depositional setting and enrichment mechanism of organic matter of the black shales of Niutitang Formation at the bottom of Lower Cambrian, in Well Yuke 1, southeast Chongqing[J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2015, 35(2): 70-80.

(编辑 常燕)