

砂砾岩物源供给能力定量评价

——以济阳坳陷车镇凹陷郭局子洼陷为例

王延章¹,林红梅²,冯建伟³,栗宝鹃⁴,曹晓莉⁵,蔡宏兴⁶,胡秋媛¹

[1. 中国石油大学 胜利学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石化 胜利油田分公司 勘探开发研究院, 山东 东营 257015;

3. 中国石油大学(华东) 地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 4. 中海石油 环保服务(天津)有限公司, 天津 300450; 5. 中国石化 地球物理公司 胜利分公司, 山东 东营 257093; 6. 中国石化 胜利

油田分公司 现河采油厂, 山东 东营 257068]

摘要:陡坡带砂砾岩具有扇体类型多、物源多、沉积速率快的特征,物源供给能力是控制砂砾岩规模和沉积体系的主要因素之一,其定量表征一直是约束沉积体系研究的薄弱环节。为了解决砂砾岩物源供给能力的定量表征问题,在砾岩含量、砂地比、岩性指数、隔夹层的发育程度、矿物含量和粒度分布研究的基础上,利用与物源供给速率成正比的参数和与物源供给速率成反比的参数进行量化加权平均,求取物源供给指数。结果表明,物源供给指数高值区主要分布在北部靠近埕南断层下降盘处,主要呈裙状沿大断层分布;物源供给能力控制砂砾岩规模,板式、铲式、阶梯式和坡坪式边界断层的砂砾岩分布模式和规模随着物源供给能力的变化而不同。物源供给能力与水深联合控制沉积相类型,随着水深和物源供给能力的变化,依次发育河流相、冲积扇、碳酸盐岩、三角洲、扇三角洲、浊积扇、湖底扇和近岸水下扇等沉积类型。

关键词:砂砾岩;物源供给能力;沉积相;郭局子地区;车镇凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Quantitative evaluation of provenance supply capacity for sandy conglomerates: A case study of Guojuzi subsag in Chezhen Sag

Wang Yanzhang¹, Lin Hongmei², Feng Jianwei³, Li Baojuan⁴, Cao Xiaoli⁵, Cai Hongxing⁶, Hu Qiuyuan¹

[1. Shengli College, China University of Petroleum, Dongying, Shandong 257061, China; 2. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Shengli Oilfield Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257015, China; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China; 4. China Offshore Environmental Services Co. Ltd., CNOOC, Tianjin 300450, China; 5. Shengli Branch of Geophysical Corporation Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong, 257093, China; 6. Xianhe Oil Production Plant, Shengli Oilfield Company Ltd., SINOPEC, Dongying, Shandong 257068, China]

Abstract: Sandy conglomerates in steep slopes are characterized as various fan types, abundance of provenances, and high deposition rate, and the provenance supply capacity is one of the main factors controlling sandy conglomerate scale and its sedimentary system. However, the quantitative study of provenance supply is always a weak point which constrains the study of sedimentary system. In order to address the problem, we worked out the provenance supply index with weighted average of parameters which have positive and inverse relation with provenance supply rates. The calculation was based on the study of conglomerate content, ratio of sand and formation, lithologic index, development degree of interbed (frequency, thickness, percentage), mineral content, granularity distribution. And the results show that (1) the areas with high provenance supply indexes are mainly distributed in the north, close to the downthrown side of Chengnan fault, along large faults in the form of apron; (2) the provenance supply capacity determines the development scale of sandy conglomerates; the distribution patterns and scales of sandy conglomerates beside plate-, shovel-, ladder- and slope-shaped boundary faults vary with the varying provenance supply capacities. In addition, a combination of the provenance supply capacity and depth of water controls the types of sedimentary facies. With the change of these two factors, the studied area has de-

收稿日期:2017-06-21;修订日期:2018-03-06。

第一作者简介:王延章(1970—),男,副教授、博士后,油气田勘探及油藏描述。E-mail:wyzwbq@sina.com。

基金项目:国家科技重大专项(2011ZX05006);中国石油大学胜利学院科研计划重点项目(KY2017010)。

veloped such sedimentary facies as fluvial facies, alluvial fan, carbonate rock, delta, fan delta, turbidite fan, sublacustrine fan, coastal subsea apron and so on.

Key words: provenance supply capacity, sedimentary facies, sandy conglomerate, Guojuzi area, Chezhen Sag, Bohai Bay Basin

断陷盆地陡坡带具有良好的源岩和运移条件,具备较好的勘探潜力。车镇凹陷位于济阳拗陷北部,具有典型中国中生代陆相断陷湖盆特征,其物源和油源都十分丰富(图1)^[1-4]。陡坡带各种类型扇体具有构造背景特殊、物源多、沉积速率快、沉积厚度大和多期叠置的特征^[5-6],其物源供给能力是控制砂砾岩规模和沉积体系的主要因素之一,而目前关于物源供给能力的量化特别是陡坡带砂砾岩物源供给能力的量化,仅有部分学者做过研究^[7-8]。物源供给能力的量化研究一直是约束沉积体系研究的薄弱环节。

本文结合渤海湾盆地车镇凹陷郭局子地区陡坡带砂砾岩体的展布规律,系统阐述了砂砾岩体发育的物源供给能力的量化研究方法,阐明了物源供给能力对砂砾岩和沉积体系的控制作用。

1 物源供给指数求取原理

物源供给能力控制了砂砾岩的规模。较强的物源供给能力往往能够形成较大规模、叠合连片分布的砂

砾岩,而物源供给能力较小,往往形成较小规模、单独分布的砂砾岩。因此,可以应用物源供给指数来表征物源供给能力。

物源供给表征参数是指能够反映断陷湖盆物源供给能力,与物源供给具有较好的相关关系的参数,主要有含砂率、砾岩含量、粒度、分选系数、层理、隔夹层的发育程度、岩性、重矿物分布和矿物分布等^[3,8],可以采用这些参数进行加权平均求取物源供给指数,以期定量表征陆相湖盆陡坡带砂砾岩沉积的物源供给情况。

1.1 与物源供给速率成正比的参数

1) 砂地比

即砂岩总厚度与地层厚度之比,是判断沉积相、表征物源供给能力和判断物源方向的依据。砂地比越高,物源的供给能力越强^[8]。

2) 砾岩含量

砾岩是由从母岩上破碎下来的,颗粒直径大于2 mm的碎屑,经过搬运、沉积、压实、胶结而形成的岩

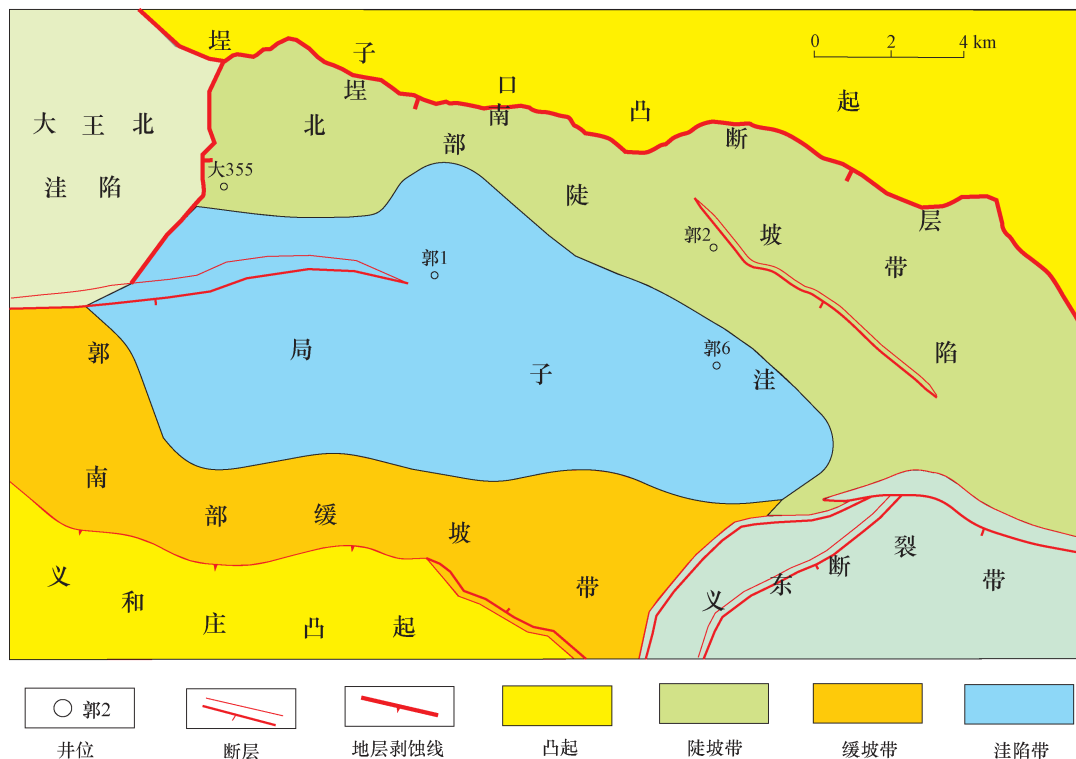


图1 车镇凹陷构造区划

Fig. 1 Tectonic division of Chezhen Sag

石。砾岩的形态和含量反映陆源区的母岩成分和沉积速度,并能反映物源供给能力。砾岩中砾石成分和直径变化是反映物源供给能力的直接证据。利用砾石中不同成分的含量、粒径大小及所占百分比等统计资料,能区分源岩的主要岩性、供给能力和搬运距离^[9-11]。

3) 粒度参数

指颗粒直径大小,主要包括粒度中值、 C 值和粒度方差,是颗粒或矿物大小的度量^[12]。粒度分析结果可指示沉积物物源供给能力、形成条件和环境。粒度越粗物源供给速率越高、粒度越细供给速率越低;粒度方差越大分选越差,供给速率越高^[13]。粒度中值是一个样品的累计粒度分布百分数达到50%时所对应的粒径。粒度方差是度量随机变量和其数学期望(即均值)之间的偏离程度,是每个样本值与全体样本值的平均数之差的平方值的平均数。 C 值是累积曲线上含量为1%的粒径值代表近似的最大粒径^[13]。

4) 层理类型

指在岩石形成过程中产生的由成分、颜色、颗粒大小、结构和构造等的差异表现出的岩石成层构造^[12]。一般情况下层理规模越大物源供给速率越高,交错层理物源供给速率高而水平层理供给速率低^[14]。

5) 岩性参数

岩性是指岩石的一些属性,如颜色、成分、结构、胶结物及胶结类型、特殊矿物等^[15]。岩性参数表示各类岩石分布情况及其相互关系。岩性越粗供给速率越高,越细供给速率越低。

6) 不稳定重矿物分布

重矿物一般稳定性强,能较多地保留其母岩的特征,在物源分析中占有重要地位,分为不稳定重矿物和稳定重矿物。碎屑沉积物中重矿物的总体特征取决于母岩的性质、水体的动力条件和重矿物的搬运距离。在矿物碎屑搬运的过程中,不稳定的重矿物逐渐发生机械磨蚀或化学分解,因而随着搬运距离的增加,性质不稳定的重矿物逐渐减少,而稳定重矿物的相对含量逐渐升高^[16-17]。

不稳定矿物有黑云母、绿泥石、绿帘石、磷灰石、白云母等^[16-17]。不稳定重矿物抗风化能力弱,远离母岩区含量相对减少。物源供给能力越大,不稳定重矿物含量越高,反之则不稳定重矿物含量越小。

7) 矿物分布

碎屑砂岩组分和结构构造受控于大地构造背景,其主要碎屑颗粒为石英、长石和岩屑^[18]。

碎屑沉积物在其沉积成岩之前,会经历一定时期

的搬运,随着搬运时间和距离的增加,沉积物中相对稳定的成分越来越多,不稳定的成分越来越少,物源的方向大体上是由成熟度低的地方指向高的地方,因此可以通过稳定矿物单晶石英与不稳定矿物长石和岩屑的质量分数之比(成分成熟度)来反演物源的方向和物源供给能力^[19-20]。

岩屑一般指示快速侵蚀、靠近母岩区的沉积^[21]。岩屑颗粒多呈椭圆状,沉积岩岩屑主要为泥岩岩屑,变质岩岩屑主要为云母片岩、千枚岩岩屑等^[21]。岩屑的类型及含量能够准确地反映物源区的岩性、物源供给能力、风化作用的类型、程度及搬运距离^[22]。因此,通过对碎屑组分中的岩屑类型及其含量的分析,可得到有关物源方向、物源供给能力和母岩性质的直接信息。

长石颗粒呈短柱状或次圆状等,在砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩中长石含量变化较大。长石的含量一般与地形高差、侵蚀速率、物源供给能力以及气候条件等因素有关^[23]。

1.2 与物源供给速率成反比的参数

包括分选系数、稳定重矿物含量、隔夹层发育程度(频数、频率、厚度比例)、石英含量及稳定系数。

1) 分选系数

指粒度累积曲线上25%和75%处所对应的颗粒直径的比值,是表示碎屑沉积物(岩)分选性的一种参数^[13]。分选系数越大代表物源供给能力越小,反之则代表物源供给能力越高。

2) 稳定重矿物含量

即锆石、金红石和电气石的总数,是重矿物组合成熟度的度量^[24-25]。稳定重矿物抗风化能力强、分布广,远离母岩区含量相对升高^[26]。稳定重矿物含量越低供给速率越高。

3) 隔夹层发育程度

隔夹层指在一定压差范围内能阻止流体在层组之间互相渗透的非渗透岩层。夹层是指单砂层(单油气层)之间或内部分布不稳定的不渗透或极低渗透的薄层。隔夹层的发育程度是指隔夹层的厚度与地层厚度或砂体厚度的比值,本区主要指泥质隔夹层,主要为灰色、深灰色泥岩,其次为纹层状泥岩及粉砂质泥岩,为砂砾岩沉积间断期半深湖或深湖正常沉积条件下形成的^[27]。

4) 石英含量及稳定系数

石英颗粒呈锥状、椭圆状、溶蚀状、次圆状等形态。在细砂岩中单晶石英含量较高,在中砂至粗砂级的砂

岩中单晶石英含量一般较低^[23]。石英分布具有一定规律,距离物源较远,矿物搬运距离大,物源供给能力较低,石英含量高;距离物源近,物源供给能力高,沉积物分选差,石英含量低。

稳定系数为稳定矿物与不稳定矿物的比值,是石英与长石和岩屑含量总和的比值。物源供给能力越大,长石和岩屑含量高,稳定系数较低。

2 各参数平面分布

2.1 砾岩含量

砾岩含量代表了沉积过程中的粗碎屑含量和物源的母源特征,也代表了物源供给能力和水动力能量。

从郭局子洼陷沙三中下段(沙河街组三段中下段)砂砾岩等值图可以看出(图 2),砂砾岩厚度中心主要分布在北部靠近埕南断层下降盘处,主要呈裙状沿大断层分布,其余部位厚度较薄。

2.2 砂地比

砂地比等值线图能反映物源的方向和特征,其含义为砂岩或砾岩与地层厚度的相对比值,其受古地形、后期的剥蚀和构造抬升作用是均等的^[28]。砂地比反映物源供给能力大小。含砂率高值区主要分布在北部郭 4、郭 2 和郭 6 井周缘,南部砂地比较低。

2.3 岩性指数

岩性指数是将岩性进行量化的方法。根据其与物源供给的关系,研究中角砾岩取 1.4,砾岩取 1.2,含砾砂岩取 1,粗砂岩取 0.8,细砂岩取 0.6,泥质砂岩取 0.5,粉砂岩取 0.4,泥质粉砂岩取 0.3,灰岩取 0.2,粉砂质泥岩取 0.1,泥灰岩取 0.1,泥岩取 0。

郭局子洼陷沙三上岩性指数高值区主要分布在西北部大 354,北部郭 4、郭 2、郭 6 井周缘,分布在北部靠近埕南大断层周缘,其余部位岩性指数较低(图 3)。

2.4 隔夹层发育程度(频数、厚度、百分比)

泥岩隔夹层频数是砂砾岩内部泥岩隔夹层的数量,反映了砂砾岩的期次性和砂砾岩的物源供给能力。隔夹层发育程度越高,代表物源供给能力越差,从沙河街组泥岩隔夹层频数看,北部隔夹层厚度为 0,不发育,代表物源供给能力高;南部隔夹层频数超过 100,隔夹层发育,代表物源供给能力低(图 4)。

泥岩隔夹层厚度也反映了砂砾岩的物源供给能力。北部隔夹层厚度为 0,南部隔夹层厚度超过 400 m,说明了北部和南部物源供给能力的差异。泥岩隔夹层厚度百分比北部为 0,南部厚度百分比超过 80%,说明南部物源供给能力远小于北部。

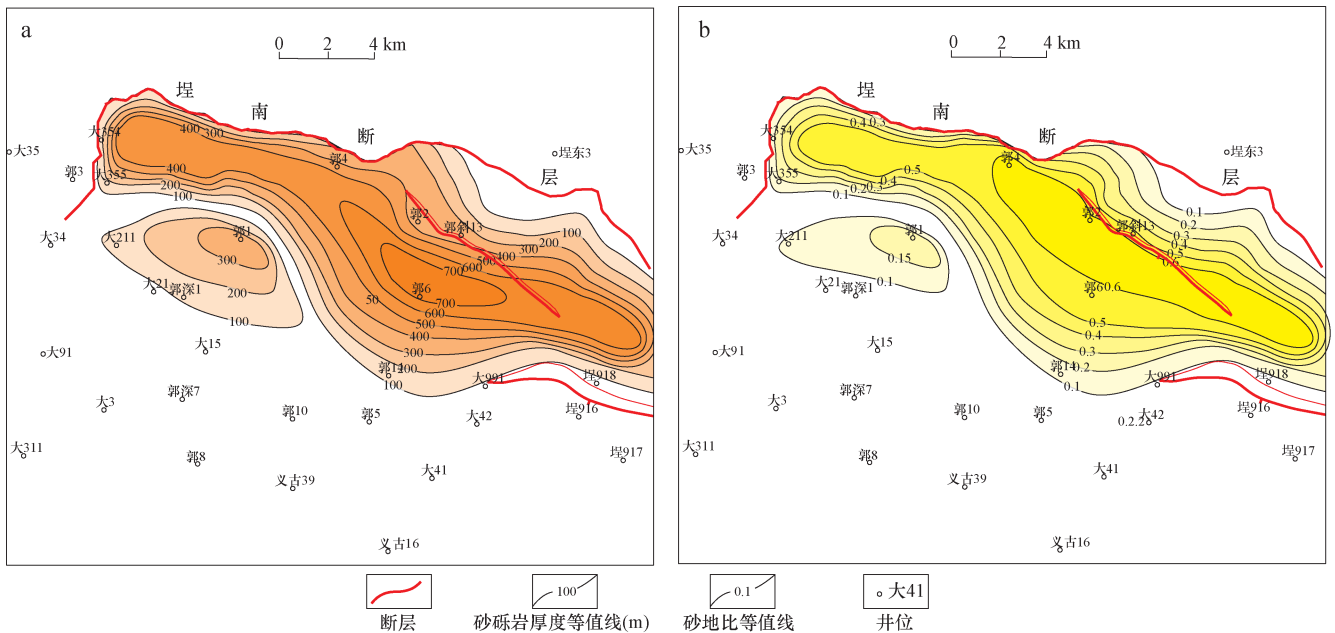


图 2 郭局子洼陷沙三中下段砾岩含量及砂地比等值线

Fig. 2 Contour map of sandy conglomerate and ratio of sand and formation in the lower-middle section of Sha 3

member of Guojuzi subsag

a. 郭局子洼陷沙三中下段砾岩及含砾砂岩厚度等值线;b. 郭局子洼陷沙三中下段砂地比等值线

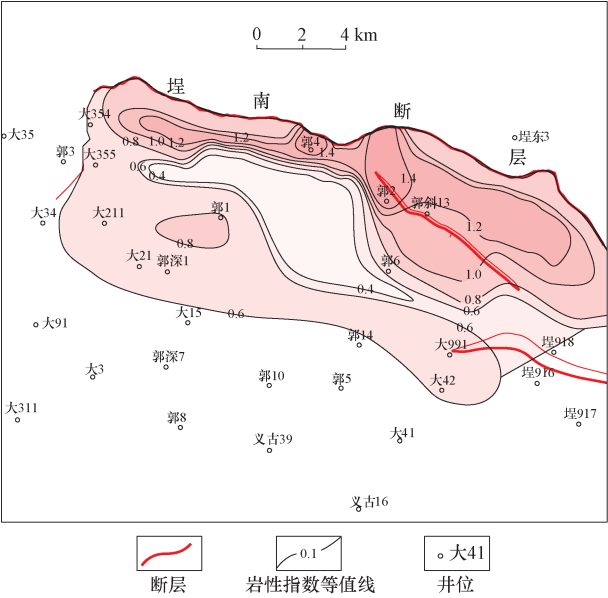


图 3 郭局子洼陷 S_3 岩性指数等值线
Fig. 3 Lithologic index contour map of the upper section of S_3 in Guojuzi subsag

2.5 石英、长石和岩屑含量

长石的稳定性较差,距离物源区较远含量较低,距离物源区越近含量越高。岩屑的稳定性也较差,距离物源区越远,岩屑的含量越低,距离物源区越近,岩屑的含量越高。

石英的物理性质和化学性质十分稳定,石英含量

和稳定系数高则指示距离物源区远,物源供给速率差,低值指示物源供给速率较高。

石英含量低值区主要分布在郭局子洼陷北部郭 4、郭 2 和郭 6 井周缘,其余部位石英含量较高。长石、岩屑含量高值区主要分布在郭局子洼陷北部靠近断层区域,其余部位长石、岩屑含量较低(图 5a,b)。

2.6 粒度中值和 C 值

粒度中值高值区主要分布在郭局子洼陷北部,其余部位粒度中值较低。C 值高值区主要分布在北部郭 4、郭 2 和郭 6 井周缘,其余部位 C 值较低。

3 物源供给指数

3.1 归一化方法

与综合指数成正比的参数,根据最大值与最小值之间的差值,采用(样本值 - 最小值)/(最大值 - 最小值)进行归一化。与综合指数呈反比的参数,根据(最大值 - 样本值)/最大值进行归一化。

对砾岩及含砾砂岩、砂地比、岩性指数、隔夹层频数、隔夹层厚度、泥岩百分比、石英含量、长石含量、岩屑含量、粒度中值、C 值参数进行加权平均,求得了物源供给指数。

根据以上方法,确定了物源供给指数,来表征物源供给能力^[29]。如果物源供给速率 < 沉降速率,则形

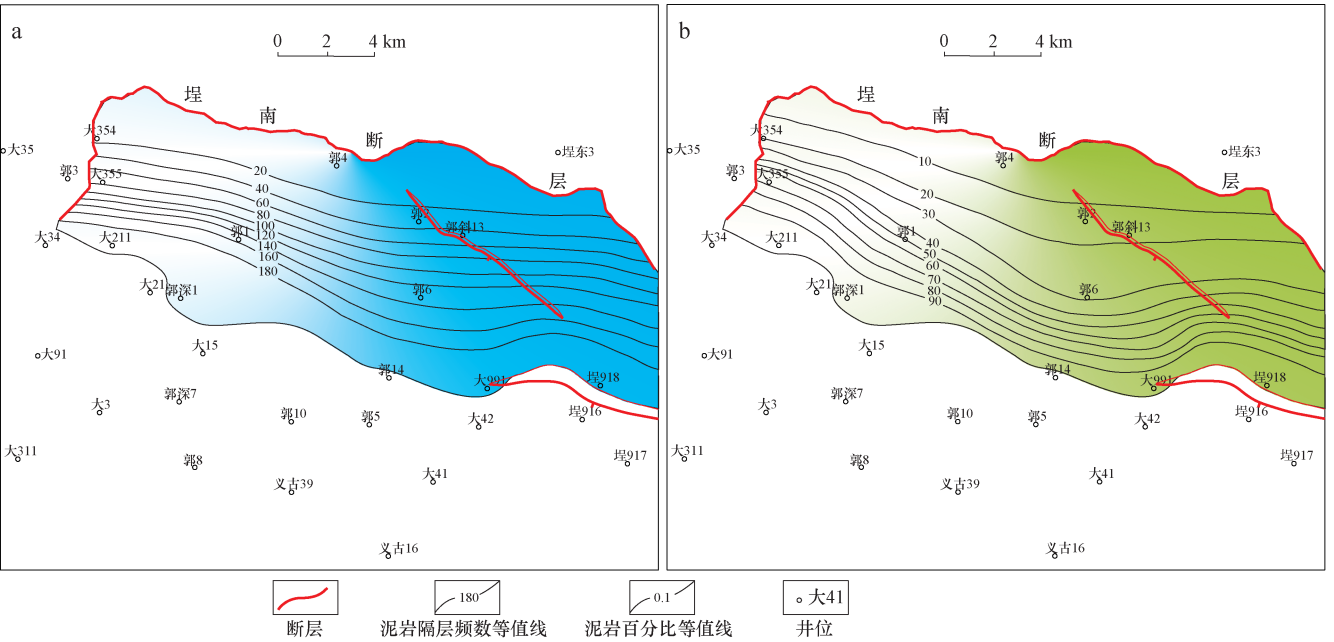


图 4 郭局子洼陷沙河街组泥岩隔夹层频数及泥岩百分比等值线

Fig. 4 Contour map showing the frequency of mudstone interbeds and their mudstone percentage in the Shahejie Formation in Guojuzi Sag
a. 郭局子洼陷沙河街组泥岩隔夹层频数等值线;b. 郭局子洼陷沙河街组泥岩百分比等值线

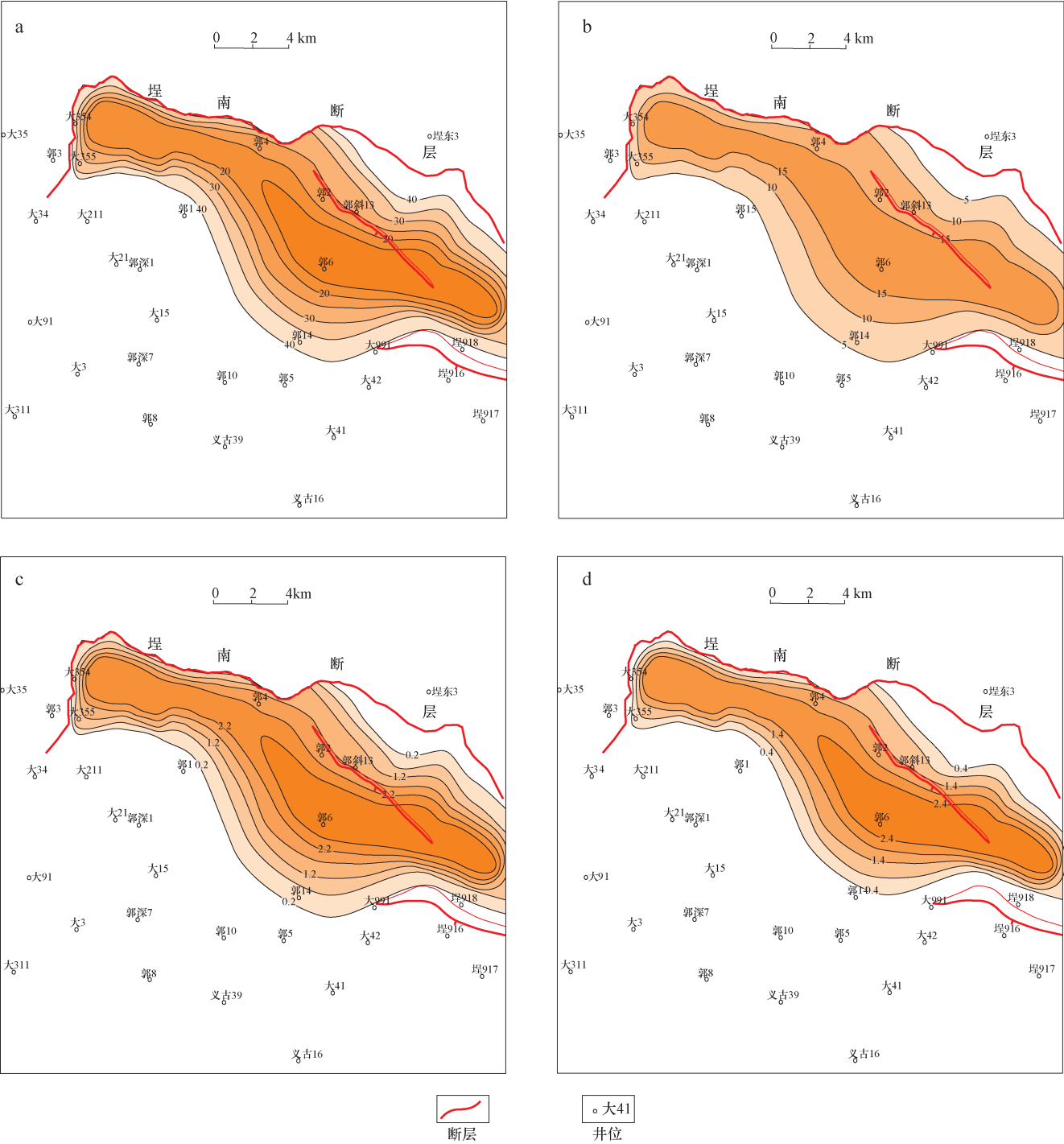


图 5 郭局子洼陷沙河街组石英、长石、粒度中值和 C 值含量等值线图
Fig. 5 Contour map showing quartz, feldspar, granularity medium, and C value of the Shahejie Formation in Guojuzi Sag
a. 石英含量; b. 长石含量; c. 粒度中值; d. C 值

成沟扇对应,各扇体相间分布;如果沉积物供给速率 $\geq$ 沉降速率,也发育沟扇对应,但是各砂砾岩体叠合连片。

3.2 物源供给指数分布

从沙三中下段物源供给指数等值图看,指数高值

区主要分布在北部大 354、郭 4、郭 2 和郭 6 井周缘,靠近埕南断层下降盘处,主要呈裙状沿大断层分布。其余部位物源供给指数较低(图 6)。

沙二和沙三上段物源供给指数高值区主要分布在北部郭 4 和郭 2 井周缘,其余部位物源供给指数较低。砂砾岩的物源供给能力明显小于沙三中下沉积时期。

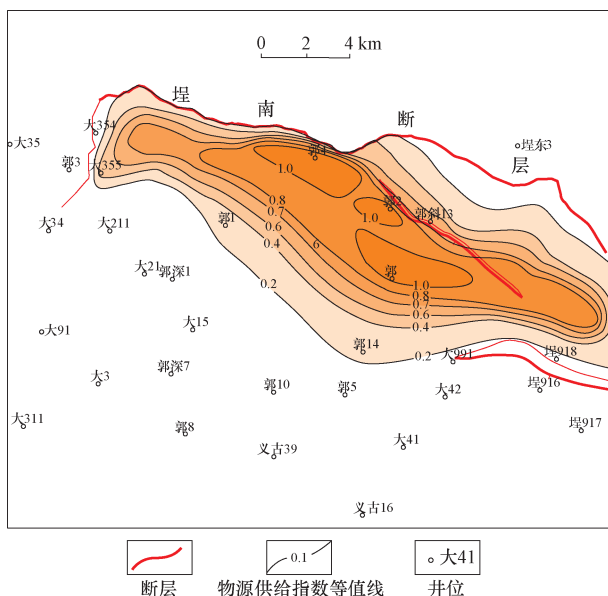


图6 郭局子洼陷沙三中下段物源供给指数等值线
Fig. 6 Provenance supply index contour map of the lower section of Sha 3 member in Guojuzi Sag

4 物源供给能力对砂砾岩扇体类型的控制作用

4.1 物源供给能力控制砂砾岩规模

车镇凹陷及郭局子洼陷陡坡带边界断层类型可以划分为板式、铲式、阶梯式和坡坪式^[30-31]。北部边界断层自中生界末期开始活动,在沙四沉积时期断层活动增强,形成滨浅湖沉积,为断陷初始期;在沙三下沉积时期断层活动进一步增强,在沙三中沉积时期进入断陷鼎盛期,断层活动强度最大;在沙三上和沙二沉积时期断层活动减弱,碎屑物源供给能力增强,盆地进入充填期。边界断层在沙二、沙三沉积时期均为同沉积断裂,对砂砾岩沉积具有控制作用。

随着物源供给能力的变化,不同类型边界断层的砂砾岩分布模式和分布规模不同。

1) 铲式断层断面上陡下缓,物源供给能力控制近岸水下扇的扇体规模。物源供给能力较小时,近岸水下扇扇体规模小,浊积砂体不发育;随着物源供给能力增强,形成的近岸水下扇规模加大。即使在地层产状为凸型情况下,物源供给能力强的近岸水下扇扇体也能够越过凸形地层的最高点边界,形成近岸水下扇和滑塌浊积沉积。

2) 板式断层倾角大,坡陡水深,主要发育近岸水下扇沉积。在物源供给能力较低时,近岸水下扇的扇体规模小,滑塌浊积扇不发育,泥岩隔夹层较多;随着

物源供给能力的增加,扇体规模增大,前方滑塌浊积扇也逐渐发育,泥质隔夹层规模变小。

3) 阶梯式断层由两条以上互相平行形成阶梯状的主断裂构成,常发育近岸水下扇和浊积扇体,有时也发育冲积扇和扇三角洲。在物源供给能力较低时,近岸水下扇的扇体规模小,泥岩隔夹层较多,滑塌浊积扇不发育;随着物源供给能力的增加,扇体规模增大,除了在高台阶发育近岸水下扇外,也可能发育扇三角洲和冲积扇等,在低台阶处也可能发育近岸水下扇、深水浊积扇和滑塌浊积扇,前方滑塌浊积扇数量增加、规模增大(图7)。

4) 坡坪式断层是在阶梯式边界断的断剖面上残留前古近系潜山。在物源供给能力较低的时候,仅在高台阶主断面与潜山的沟谷内发育冲积扇和扇三角洲,在靠近前方的断层下降盘不发育近岸水下扇和浊积扇。随着物源供给能力的增加,除了在高台阶主断面与潜山的沟谷内发育规模更大的冲积扇和扇三角洲外,在靠近前方的断层下降盘发育近岸水下扇和浊积扇,物源供给能力越大,近岸水下扇的规模越大,浊积砂体的数量和规模也增大。

4.2 物源供给能力控制沉积类型

物源供给能力与水深联合控制沉积相类型。在陆上沉积物源供给能力较低时,主要发育曲流河沉积,在物源供给能力中等时变化为辫状河沉积,在物源供给能力较高时演变为冲积扇沉积。在浅湖沉积物源供给能力极低时,主要发育碳酸盐岩沉积;在物源供给能力较低的时候,主要发育砂岩滩坝和曲流河三角洲沉积;物源供给能力中等时发育辫状河三角洲沉积;在物源供给能力较高时发育扇三角洲沉积。在半深湖和深湖沉积物源供给能力极低时,主要发育泥晶碳酸盐岩沉积;在物源供给能力较低的时候,主要发育滑塌浊积扇沉积,在物源供给中等的时候主要发育湖底扇沉积;在物源供给能力较高的时候发育近岸水下扇沉积。随着物源供给能力的增加,泥质隔夹层的厚度、数量变少(图8)。

5 结论

1) 应用物源供给指数来表征物源供给能力,与物源供给速率成正比的参数主要有:砂地比、粒度中值、粒度方差、层理类型、岩性系数。与物源供给速率成反比的参数主要有:隔夹层的发育程度(频数、频率、厚度比例)、分选系数、稳定重矿物的含量、石英长石岩屑含

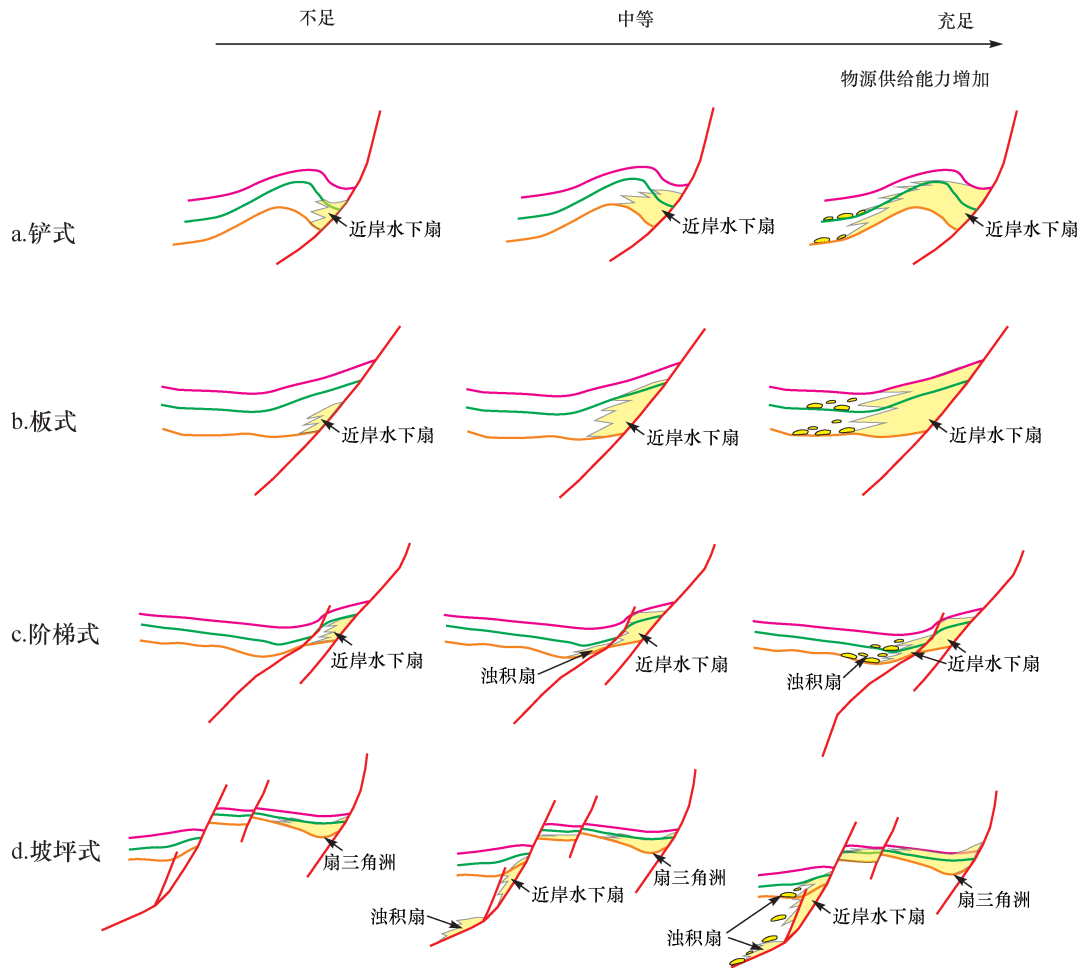


图 7 物源供给能力对砂砾岩规模的控制模式

Fig. 7 Control of provenance supply capacity on scale of sandy conglomerates

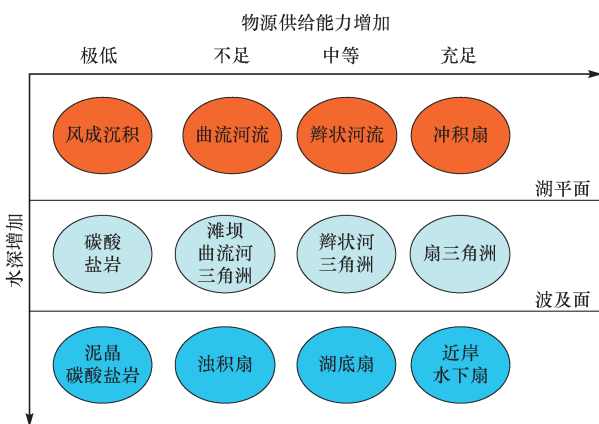


图 8 物源供给能力、水深与沉积类型的关系

Fig. 8 Relationship of provenance supply capacity, water depth and sedimentary types

量及其比值。

2) 砾岩含量代表了沉积过程中的粗碎屑含量,代表了物源的母源特征,也代表了物源供给能力和水动力能量。含砂率反映物源供给能力大小,岩性

指数是将岩性进行量化的方法。隔夹层的发育程度(频数、厚度、百分比)反映了砂砾岩的期次性,也反映了砂砾岩的物源供给能力。石英分布随着距离物源越远,矿物搬运距离越大,石英含量越高;距离物源近,沉积物分选差,石英含量低。长石、岩屑分布距离物源区较远稳定性较差因而含量较低,距离物源区越近含量越高。粒度中值和C值高值区也代表了物源供给能力的大小,高值区主要分布在北部,其余部位较低。

3) 沙河街组物源供给指数高值区主要分布在北部靠近埕南断层下降盘处,主要呈裙状沿大断层分布,其余部位物源供给指数较低。

4) 物源供给能力对砂砾岩扇体类型具有明显的控制作用,主要表现在两个方面:一是物源供给能力控制砂砾岩规模,随着物源供给能力的变化,板式、铲式、阶梯式、坡坪式边界断层的砂砾岩的分布模式和分布规模不同;二是物源供给能力与水深联合控制沉积相类型,随着水深和物源供给能力的变化,依次发育河流

相、冲积扇、碳酸盐岩、三角洲、扇三角洲、浊积扇、湖底扇、近岸水下扇等沉积类型。

参 考 文 献

- [1] 毕义泉,刘里勤,沈国华. 王庄油田郑408砂砾岩体储集层非均质性及其敏感性研究[J]. 石油勘探与开发,2000,27(6):42-44.
Bi Yi quan, Liu Liqin, Shen Guohua. A study of heterogeneity and water sensitivity of conglomeratic Zheng-408 sand body in Wangzhuang oil field[J]. Petroleum Exploration and Development, 2000, 27(6), 42-44.
- [2] 张鑫,张金亮. 胜坨地区沙三下亚段砂砾岩体沉积特征及沉积模式[J]. 石油学报,2008,29(4):533-538.
Zhang Xin, Zhang Jinliang. Depositional feature and mode of sand-conglomerate bodies in the lower third member of Shahejie Formation in Shengtuo area[J]. Acta Petrolei Sinica, 2008, 29(4):533-538.
- [3] 孙龙德. 东营凹陷北部斜坡带沙三—四段砂砾岩体与油气聚集[J]. 沉积学报,2003,21(2):278-282.
Sun Longde. Sandstone-conglomerate bodies in Sha3~4 Members and hydrocarbon accumulation in northern slope of Dongying Sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(2):278-282.
- [4] 周廷全,鲜本忠,林会喜,等. 车镇凹陷陡坡带古近系湖底扇沉积规律及储层特征[J]. 油气地质与采收率,2007,14(2):23-27.
Zhou Tingquan, Xian Benzong, Lin Huixi et al. Sedimentary rules and reservoir characteristics of sublacustrine fan in Paleogene in steep slope of Chezhen Sag[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2007, 14(2):23-27.
- [5] 王金铎,许淑梅,季建清,等. 车镇凹陷北部陡坡带砂砾岩体识别与储层物性预测[J]. 海洋地质与第四纪地质,2008,28(2):93-98.
Wang Jinduo, XU Shumei, Ji Jianqing, et al. Recognition of sand-gravel body and forecasting its petroleum-bearing feature in northern steep slope of Chezhen Sag[J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2008, 28(2):93-98.
- [6] 王蛟,姜在兴,陈世悦,等. 渤海湾盆地车镇凹陷沙三—沙一段沉积演化与有利砂体预测[J]. 石油实验地质,2005,27(4):371-377.
Wang Jiao, Jiang Zaixing, Chen Shiyue et al. Sedimentary facies evolution and favorable sandstone body prospect in the Third to First Members of the Shahejie formation of Paleogene in the Chezhen Sag of the Bohaiwan Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(4):371-377.
- [7] 胡受权. 湖平面变化及物源供给对陆相层序影响机理的计算机模拟. 断块油气田,2000,7(6):1-4.
Hu Shouquan. Computer simulation on influencing mechanism of lacustrine level change and sedimentary source recharge in terrigenous sequence[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2000, 7(6):1-4.
- [8] 王延章,宋国奇,王新征,等. 物源供给指数及其对滩坝发育的控制作用. 大庆石油地质与开发,2013,23(1):49-53.
Wang Yanzhang, Song Guoqi, Wang xinzhen et al. Index of provenance provision and its controlling on the development of beach and bar[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2013, 23(1):49-53.
- [9] 刘腾,陈刚,徐小刚,等. 物源分析方法及其发展趋势. 西北地质,2016,49(4):121-128.
Liu Teng, Chen Gang, Xu Xiaogang, et al. Methods and development trend of provenance analysis [J]. Northwestern Geology, 2016, 49(4):121-128.
- [10] 徐强,廖仕孟,朱永刚,等. 川西龙门山前陆盆地中砂砾质楔形体的定量统计[J]. 沉积与特提斯地质,2000,20(4):31-37.
Xu Qiang, Liao Shimeng, Zhu Yonggang, et al. Quantitative statistics of sandy and gravelly wedges in the Longmenshan foreland basin, Sichuan[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20(4):31-37.
- [11] 赵红格,刘池洋. 物源分析方法及研究进展[J]. 沉积学报,2003,21(3):409-415.
Zhao Hongge, Liu Chiyang. Approaches and prospects of Provenance Analysis[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(3):409-415.
- [12] 裘亦楠. 中国陆相储层沉积学的进展[J]. 沉积学报. 1992, 10(3):16-24.
Qiu Yinan. Developments in reservoir sedimentology of continental clastic rocks in China [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1992, 10(3):16-24.
- [13] 赵澄林,朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 北京:石油工业出版社,2001.
Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.
- [14] 田继军,姜在兴,李熙喆. 川中上三叠统须二段厚层砂岩的成因及其对储层、气藏的控制[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):43-46.
Tian Jijun, Jiang Zaixing, Li Xizhe. Genesis of the thick sandstone of Xujiahe formation Member II of upper Triassic and the influences on reservoir and gas pool in Chuansong region[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2008, 27(2):43-46.
- [15] 易定红,裴明利,张菊梅,等. 柴西红三早一号—牛鼻子梁地区下油砂山组物源与沉积体系[J]. 新疆石油地质,2009,30(6):696-698.
Yi Dinghong, Pei Mingli, Zhang Jumei, et al. Provenance and sedimentary system of lower Youshashan formation in Hongsanhan-yihao-Niubiziliang area in western Qaidam Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2009, 30(6):696-698.
- [16] 李珍,焦养泉,刘春华,等. 黄骅坳陷高柳地区重矿物物源分析[J]. 石油勘探与开发,1998,25(6):5-7.
Li Zhen, Jiao Yangquan, Liu Chunhua, et al. Provenance analysis of heavy mineral in Gaoliu area of Huanghua Depression[J]. Petroleum Exploration and Development, 1998, 25(6):5-7.

- [17] 何钟铎,刘招君,张峰. 重矿物分析在盆地中的应用研究进展[J]. 地质科技情报,2001,20(4):29-32.
He Zhonghua, Liu Zhaojun, Zhang Feng. Latest progress of heavy mineral research in the basin analysis[J]. Geological Science and Technology Information,2001,20(4):29-32.
- [18] 米董哲,翟亚若,翟靖. 含油气盆地物源分析研究方法进展[J]. 地下水,2013,35(5):207-209.
Mi Dongzhe, Zhai Yaru, Zhai Jing. Developments of study methods in provenance analysis in the oil-gas containing basin[J]. Underground Water,2013,35(5):207-209.
- [19] 郝强,林良彪,余瑜,等. 川西坳陷须家河组二段物源及主控因素分析[J]. 科学技术与工程,2014,14(26):5-12.
Hao Qiang, Lin Liang-biao, Yu Yu, et al. Provenance analysis and main controlling factors of second member xujiahe formation in west sichuan depression[J]. Science Technology and Engineering,2014,14(26):5-12.
- [20] 纪友亮,王勇,李清山,等. 高邮凹陷古近系戴南组戴一段物源分析[J]. 同济大学学报(自然科学版),2012,40(9):1406-1413.
Ji Youliang, Wang Yong, Li Qingshan, et al. Sediments provenance of Gaoyou depression during sedimentation of first member of Dainan formation of paleogene[J]. Journal of Tongji University(Natural Science),2012,40(9):1406-1413.
- [21] 陈全红,李文厚,王亚红,等. 鄂尔多斯盆地西南部晚古生代早—中期物源分析[J]. 现代地质,2006,20(4):628-634.
Chen Quanhong, Li Wenhong, Wang Yahong, et al. The analysis of sediment provenance in early middle period of late Paleozoic in the southwest of Ordos Basin[J]. Geoscience,2006,20(4):628-634.
- [22] 王若谷,李文厚,廖友运,等. 鄂尔多斯盆地三叠系延长组长7段物源区分析[J]. 地质通报,2013,32(4):671-684.
Wang Ruogu, Li Wenhong, Liao Youyun, et al. Provenance analysis of Chang 7 Member of Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Geological Bulletin of China,2013,32(4):671-684.
- [23] 杜叶龙,李双应,孔为伦,等. 安徽东南部二叠系龙潭组砂岩碎屑组分及物源分析[J]. 高校地质学报,2010,16(4):509-516.
Du Ye-long, Li Shuang-ying, Kong Wei-lun, et al. Sandstone detrital composition and provenance analysis of the Permian Longtan formation in southeastern Anhui province[J]. Geological Journal of China Universities,2010,16(4):509-516.
- [24] 白云凤,王振升,韦阿娟,等. 黄骅坳陷东营组重矿物时空展布特征及物源体系分析[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(2):39-42.
Bai Yunfeng, Wang Zhensheng, Wei Ajuan, et al. Time and space distribution characteristics and material resource system of heavy minerals in Dongying Formation of Huanghua Depression[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2008,27(2):39-42.
- [25] 王洪伟,杨建国,林东成. 汤原断陷古近纪砂岩重矿物组合与物源分析[J]. 大庆石油地质与开发,2007,26(3):39-46.
Wang Hongwei, Yang Jianguo, Lin Dongcheng. Combination of paleogene sandstone heavy mineral and source analysis in Tangyuan Rift[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2007,26(3):39-46.
- [26] 许秀才,刘元吉,赵建军,等. 古龙北地区姚一段地层沉积物源及古水流分析[J]. 大庆石油地质与开发,2008,27(3):36-38.
Xu Xiucui, Liu Yuanji, Zhao Jianjun, et al. Analysis on sedimentary provenance and palaeocurrent in Yao I Member in northern Gulong area[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing,2008,27(3):36-38.
- [27] 王延章,林承焰,温长云,等. 夹层分布模式及其对剩余油的控制作用[J]. 西南石油学院学报,2006,28(5):6-10.
Wang Yanzhang, Lin Chengyan, Wen Changyun, et al. The distribution pattern of interlayer and its controlling function on remaining-oil[J]. Journal of Southwest Petroleum Institute,2006,28(5):6-10.
- [28] 徐田武,宋海强,况昊,等. 物源分析方法的综合运用—以苏北盆地高邮凹陷泰一段地层为例[J]. 地球学报,2009,30(1):111-118.
Xu Tianwu, Song Haiqiang, Kuang Hao, et al. Synthetic application of the provenance analysis technique: A case study of Member 1 of Taizhou Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Geoscientia Sinica,2009,30(1):111-118.
- [29] 杨少春,杨兆林,胡红波. 嫡熵非均质综合指数算法及其应用[J]. 石油大学学报(自然科学版). 2004年,28(1):18-21.
Yang Shaochun, Yang Zhaolin, HU Hongbo. An algorithm of heterogeneous synthetic index with entropy weight[J]. Journal of the University of Petroleum, China(Edition of Natural Science),2004,28(1):18-21.
- [30] 肖焕钦,王宝言,陈宝宁,等. 济阳坳陷陡坡带断裂控砂模式[J]. 油气地质与采收率,2002,9(5):20-22.
Xiao Huanqin, Wang Baoyan, Chen Baoning et al. Fracture sand control pattern in active region of Jiyang depression[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency,2002,9(5):20-22.
- [31] 鲜本忠,王永诗,周廷全,等. 断陷湖盆陡坡带砂砾岩体分布规律及控制因素—以渤海湾盆地济阳坳陷车镇凹陷为例[J]. 石油勘探与开发,2007,34(4):429-435.
Xian Benzong, Wang Yongshi, Zhou Tingquan, et al. Distribution and controlling factors of glutinite bodies in the active region of a rift basin: an example from Chezhen Sag, Bohai Bay Basin[J]. Petroleum Exploration and Development,2007,34(4):429-435.