

苏北盆地戴南组泥屑流扇沉积

刘玉瑞

(中国石化 江苏油田分公司,江苏 扬州 225009)

摘要:针对苏北箕状断陷盆地戴南组的沉积体系、岩性岩相、砂体展布等特征,既不遵循中国东部箕状断陷盆地的一般规律,也不遵循陆相盆地沟槽带是建设扇体、砂体主带的普遍规律,通过大量岩心资料观察,发现戴南组存在一种由砂级泥岩粗岩屑组成的特殊类型沉积岩,其分布具有一定的普遍性和规律性。据此,以岩心观察描述为基础,结合岩石薄片鉴定特征、地层古生物组合特殊面貌及剖面测录井响应的一些特有现象,综合识别这套特殊岩性剖面。研究表明,这套地层是重力流之泥屑流流体的沉积产物—泥屑流扇,扇体可分扇根、扇中和扇端3带。平面上,此类扇发育在断陷湖盆凹缘坡折带,即湖盆沟槽地带;剖面上,此扇主要见于戴南组断陷湖盆低位域,湖侵域无此扇,高位域有个别此扇。分析认为,苏北箕状断陷湖盆有特殊的成盆古地质背景,即由下构造层大型的统一拗陷湖盆解体形成了相互分隔的戴南组箕状断陷群,由此形成了阜四段大套泥岩围限、新老双重物源、构造作用差异、多种搬运输送流态及多样坡折带类型等多因素耦合,共同控制了戴南组沉积特征。由此,发现了断陷凹缘坡折带发育泥屑流扇、富泥扇,断陷凸缘坡折带生长富砂扇的规律。

关键词:泥屑流扇;多因素耦合;岩石特征;沉积成因;戴南组;苏北盆地

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Mud debris flow fan deposits in Dainan Formation of the Subei Basin

Liu Yurui

(Jiangsu Oilfield Company, SINOPEC, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Several features such as sedimentary system, lithology and lithofacies and sandbody distribution in the Dainan Formation of Subei half-graben fault basin neither follow the general patterns of the half-graben faulted basins in Eastern China, nor follow the common patterns that trench belts are the main locations where fans and sandbodies occur in continental basins. Through a large number of core data observation, it is found that there is a special type of sedimentary rock composed of sand grade coarse debris of mudstone, which shows a certain universality and regularity. The special lithologic section is comprehensively identified on the basis of core observation and description and in combination with the thin section observation, paleontological assemblage and some peculiar phenomena of logging responses. The study shows that this set of strata belongs to fans resulted from mud debris flow, a type of gravity flow. The fan bodies can be divided into 3 belts including root-fan, middle-fan and outer-fan. Laterally, this kind of fan develops in the slope break zone of faulted lake basins which is trench zone of lacustrine basin. Vertically, these fans are mainly found in LST of the Dainan Formation of Subei fault basin. No such fans occur in TST, and some occur in HST. Subei half-graben fault basin was formed in a special geological setting. A large complete depressed lake basin in the lower tectonic zone disintegrated into several mutually separated half graben fault depressions. Multi factors including confining of thick mudstone in the 4th Member of Funing Formation, old and new dual provenances, tectonic difference, various transportation flow patterns and multiple types of slope break zones coupled together and controlled the sedimentary characteristics of Dainan Formation. The rules are found that the mud debris flow fans and mud-rich fans are developed in slope break zone on the concave side of fault depression and sand-rich fans occur in slope break zones on the convex side of the fault depression.

Key words: mud debris flow fan, multiple factors coupling, petrologic characteristics, sedimentary genesis, Dainan Formation, Subei Basin

苏北盆地基底以陆相中生界为主,盖层为泰州组-阜宁组(K_2t-E_1f)、戴南组-三垛组(E_2d-E_2s)、盐城组-东台组($Ny-Qd$),上、中、下3套构造层沉积岩总厚度达7 000 m。古新世末,受吴堡事件影响,盆地全面抬升剥蚀;其后,盆地再沉降,断裂和断块体强烈差异活动,将 K_2t-E_1f 大型统一湖盆解体为相分隔的10个断陷和12个(低)凸起,开始了 E_2d 箕状断陷构造沉积演化阶段^[1-2]。

多年来,众多学者对苏北盆地 E_2d 砂岩分布、扇相生长位置认识相似^[3-8];但所有公开论著和油田内部报告,对 E_2d 下列沉积现象未予解释。

第一,未遵循“逢沟必扇”的沉积学基本规律。金湖、高邮凹陷是苏北盆地的主力含油区, E_2d 层序低位域下部 $E_2d^{1(3)}$ 仅这两凹陷有沉积(图1)。其中,高邮凹陷 $E_2d^{1(3)}$ 最厚达340 m,金湖凹陷 $E_2d^{1(3)}$ 最厚约180 m。图1反映,砂岩含量低值区全部位于断陷湖盆长轴端和短轴沟槽处,各文献都把该区砂岩含量 $\leq 10\%$ 范围定为“滨浅湖相”。到低位域上部 $E_2d^{1(2)}$ 至高位域 E_2d^2 沉积范围继续不断扩大,但沟槽处砂岩含量依然较其它地区低。据报道^[9-21],陆相盆地沟槽处是扇体和砂体建造的主要地带。

第二,“逢凸有扇”的反常沉积现象。图1反映,在断陷边缘向湖区凸进的位置,即凸缘地带是砂岩主要发育区,成为富砂扇体的主建设区。这种沉积规律不仅在低位域 $E_2d^{1(2+3)}$ 表现突出,而且在湖侵域 $E_2d^{1(1)}$ 、高位域 E_2d^2 呈相似的展布格局。

第三,盆地长期的主物源区在低位域早期出现了物源供给贫乏现象。张八岭隆起是苏北盆地主物源区,长期供给东台坳陷大量粗碎屑物质,在金湖凹陷西南部建设了 K_2t-E_1f 、 $E_2d^{1(2)}-E_2s$ 巨厚的砂岩、砂砾岩地层;唯独在 E_2d 层序的低位域早期 $E_2d^{1(3)}$,西南部凹缘地带呈贫砂的“滨浅湖”沉积,出现隆起区粗碎屑物源供给匮乏的奇怪现象。

第四,断裂陡坡带砂砾岩体不甚发育。断陷断裂陡坡带是发育砂砾岩扇体的主要领域^[9-18],尤其低位域。图1中真武、吴堡断裂控制高邮凹陷 E_2d 沉积最大厚度1 700 m,杨村断裂控制金湖凹陷 E_2d 沉积最大厚度1 200 m,这3条边界断裂分别构成高邮、金湖箕状断陷的陡坡坡折带,沿着陡坡带发育了一系列扇体群^[3-8],岩性主要是泥岩和砂岩,砂砾岩体只有2处。一是真武断裂带许庄(许14井区)及两侧邵伯和肖刘庄地区。以许庄低位域 $E_2d^{1(2+3)}$ 砂砾岩体最发育、规

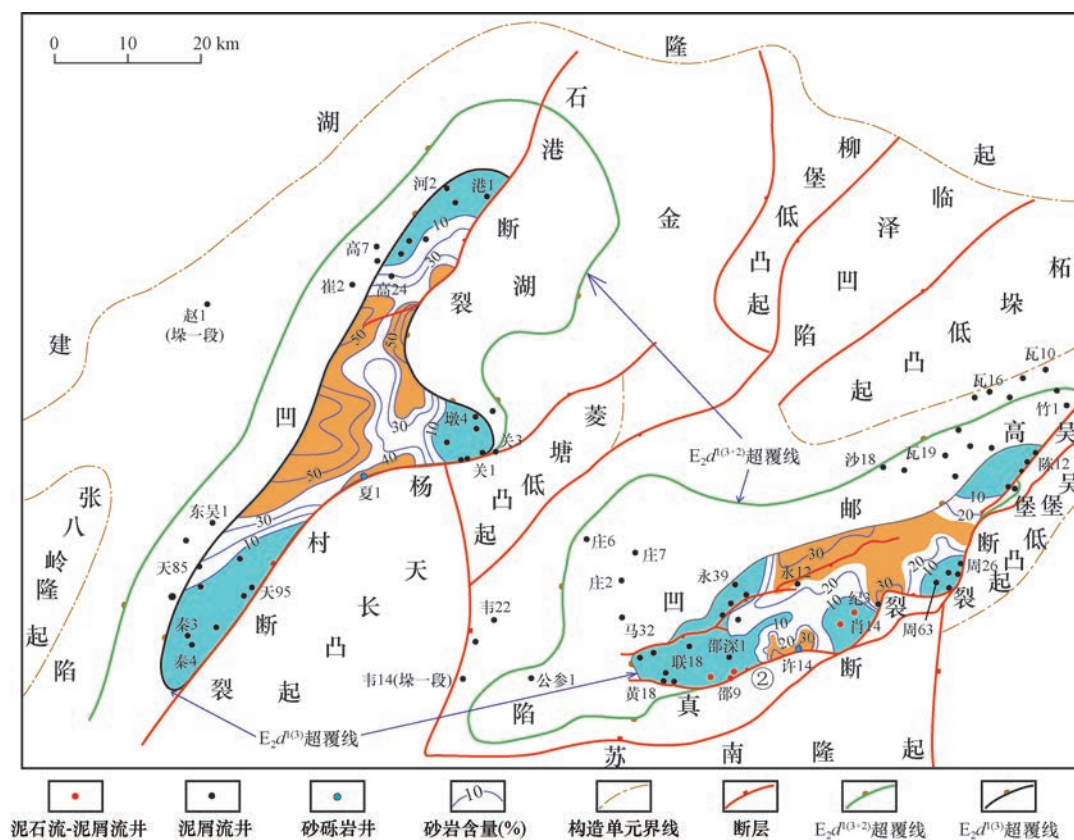


图1 金湖-高邮凹陷 $E_2d^{1(3)}$ 砂岩含量展布

Fig. 1 Net to gross ratio map of $E_2d^{1(3)}$ in the Jinhu-Gaoyou Sag

模稍大,剖面厚达270 m,岩性为中-厚层状的细-中砾岩和砂砾岩夹泥岩,可见粗砾岩;砾石成分杂,有火山岩砾、安山岩砾、碳酸盐岩砾、变质岩砾、石英岩砾和沉积岩砾等。许庄东西两侧的砂砾岩体规模小,以薄-中厚层的细-中砾岩为主,如邵9井钻遇 E_2d 厚度962 m,剖面夹有19层厚度仅0.5~1 m不等的细-中砾岩。二是杨村断裂带小关砂砾岩体,夏1井钻遇 $E_2d^{(3)}$ 含砂砾岩的剖面厚度仅50 m,砾是石英细砾;关5井钻遇 E_2d^1 多层安山质中-粗角砾岩。而吴堡断裂及盆内石港、汉留二级断裂控制的扇体群都无砾岩沉积。

由此可见,上述特点与陆相盆地沉积的普遍规律不符;如松辽^[3]、渤海湾^[10-15]、琼东南^[16]、泌阳^[17]、二连^[18]、北部湾^[19]、伦坡拉^[20]盆地等,其湖盆沟槽带是建设各类扇相、砂体的主要领域,尤其长轴端沟槽带扇体规模宏大。

E_2d 断陷是由吴堡事件造成 K_2t-E_1f 统盆全面抬升剥蚀解体基础上新生成的箕状断陷^[1-2],各断陷相互分隔(图2)。 E_2d 建在区域不整合 E_1f^4 泥岩剥蚀面上,沉积范围全部受泥岩围限,断陷周缘古地质以 K_2t-E_1f 泥岩露头为主,其巨量泥岩物源深刻影响着 E_2d 岩相和砂体建设,并沉积了一套“似泥非泥”的特殊粗碎屑岩,过去的油田内部报告和公开论著都误作“滨浅湖相”泥岩。

根据多年岩心观察认识,以岩心、古生物资料为基础标定剖面,验证其岩电性特征。现已查明,这套特殊岩石是 E_1f 泥岩再沉积到 E_2d 的产物——泥屑流沉积岩,主要分布在湖盆低位域沟槽带,即图1低砂岩含量的所谓“滨浅湖区”,它与 E_2d 控砂机制成因密切;由此也破解了渤海湾断陷沉积模式不适合苏北断陷的谜团。下面阐述这套“似泥非泥”岩石的特征、识别方法及成因。

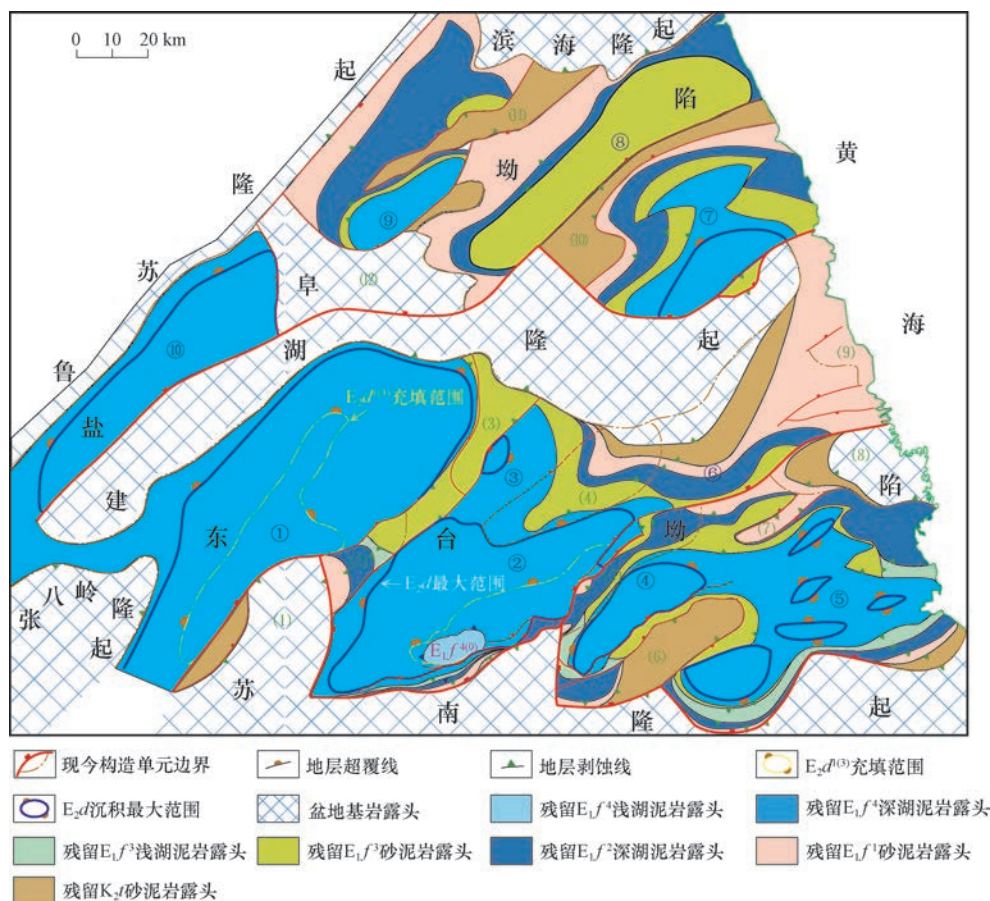


图2 苏北盆地前戴南组古地质图

Fig. 2 Paleogeologic map of the Pre-Dainan Formation in the Subei Basin

凹陷单元:①金湖;②高邮;③临泽;④溱潼;⑤海安;⑥白驹;⑦盐城;⑧阜宁;⑨涟水;⑩洪泽
(低)凸起单元:(1)天长;(2)菱塘桥;(3)柳堡;(4)柘垛;(5)吴堡;(6)泰州;(7)梁垛;(8)小海;(9)裕
华;(10)射阳;(11)大东;(12)淮安

1 戴南组一套特殊岩石特征

E_2d 这套“似泥非泥”岩石结构组分特殊,无层理构造;精细描述岩心,结合薄片、古生物和测录井响应是识别其原貌的唯一有效手段(图3)。

1.1 岩心标本及薄片特征

这套地层见于海安、金湖、高邮凹陷的断裂带、深凹带和斜坡带的11个区块,超过150口预探井钻遇。金湖、高邮凹陷6个区块13口井有取心资料,岩心总长252.67 m,周26井为系统取心。譬如,金湖凹陷崔2井 $E_2d^{1(2)}$ 有4.85 m岩心,手标本和薄片特征如图3;高邮凹陷周26井从 $E_2d^{1(1)}$ 到 E_1f^4 连续取心160 m, E_2d^1 底55 m岩心特征与图3a类似。归纳大量岩心观察认识如下:①这套 E_2d 剖面录井岩屑全呈“泥岩”状,岩心标本外观酷似“泥岩”,仅凭肉眼、不用放大镜仔细观察,极易与静水泥岩混淆。②岩石由不同结构、不同色的泥质杂基和砂级颗粒的泥质粗砂屑组成。粗砂屑清晰可辨,目估含量30%~80%不等,成分是不规则小米粒大小的陆源泥岩岩屑颗粒,砂状结构为主,

少量极细砾状,色调继承 E_1f 母岩深灰色;岩石手感粗糙,说明含硬质砂成分。杂基为红棕色泥质,含量不等、变化大。③岩石呈厚层块状,无层理构造,层面不清,容易不规则碎裂。④大致可分3种岩性:砂级泥岩粗砂屑含量 $\geq 50\%$ 的杂砂岩,如图3a所示;砂级泥岩粗砂屑含量 $< 50\%$ 的砂质泥岩;细角砾灰泥岩粗砂屑含量 $\geq 50\%$ 的角砾岩。这套剖面以前两种岩类最常见,后一种岩类很少。

这套岩石磨制的薄片特征如下:①具有泥状(泥砾状)-砂状-碳酸盐质非均匀复合结构,有些泥质如图3b实为泥砾或泥砂粒,偶见泥岩粗屑间的边缘接触关系,大部分与泥基质间的边界模糊;泥质呈纤维状、星点状、斑块状不均匀分布。②含石英、长石等粉砂,含量约8%~25%,常呈图3c局部富集状。③碳酸盐含量5%~30%不等,有方解石和灰岩砂屑,呈不均匀状、斑状富集。④泥质中常见灰岩粗砂屑等漂粒,如图3d灰岩粗砂屑具波状消光,说明母岩曾受过强烈变形改造,使矿物发生定向排列和解理缝弯曲,反映是再沉积的碎屑。

1.2 地层古生物组合特征

E_2d 含丰富的微体古生物和腹足类等原生化石。

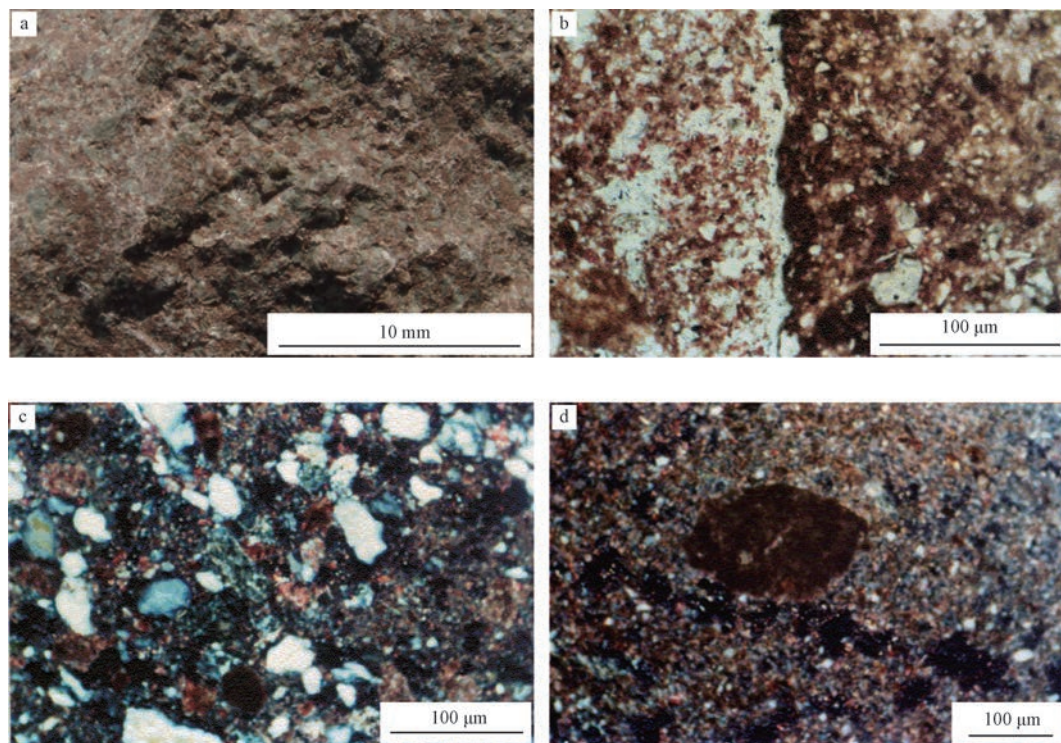


图3 苏北盆地 E_2d^1 泥屑流岩手标本及薄片特征

Fig. 3 Characteristics of core and thin sections of mud debris flow deposits of E_2d^1 in the Subei Basin

(样品来源:崔2井,埋深1 363.97 m)

- a. 岩心,灰褐色泥屑流岩(杂砂岩); b. 单偏光薄片,泥岩砾屑接触界面;
- c. 正交光薄片,细粉砂局部富集;d. 正交光薄片,见 E_1f 泥灰岩砂屑漂粒

其中,介形类以德卡里金星介为本组的带化石,德卡里金星介-网纹中华金星介-近三角形真星介为组合,化石有15属36种。腹足类 E_2d^1 化石超过13属20种,种属数量是各层系中最多的,以水栖淡水前鳃类豆螺属化石最丰富,也有陆栖肺螺类化石,说明沉积环境以滨浅湖水体为主;到 E_2d^2 化石种属数量大为减少,仅见到3属4种,主要是陆栖肺螺类化石,反映本期沉积环境水体明显浅于前期。

微体化石一般不耐风化、搬运,难再沉积;但 E_2d 混产 E_1f 再沉积介形类化石。这套特殊地层常见 E_1f^4 时限带的膨胀新单角介、阜宁中华金星介化石, E_1f^{3+4} 特征分子细网纹中华金星介等化石。研究表明,介形类原生、次生化石有重要区别:① E_2d 原生化石均呈正常沉积埋藏产出,壳饰清洁、无磨蚀;再沉积于 E_2d 的 E_1f 介形类化石呈包裹砾状产出,壳面不清洁、常破损,有搬运磨蚀、蜂窝状溶蚀等特征。②自 E_2d^1 — E_2d^2 原生化石种群呈正时序演化分布;再沉积化石产出时序恰好与 E_1f 原时序呈镜像反时序关系^[22]。由此构成了 E_2d 剖面化石群的特殊面貌,是鉴别再沉积地层的重要依据之一。

1.3 特殊剖面测、录井识别现象

这套地层岩类特殊,岩屑录井难辨真容,所有井的

综合录井图剖面都按泥岩记载,研究属空白。现以岩心和古生物等为基础,联合标定这套剖面测录井响应及识别方法。①岩屑录井的岩性呈灰褐、灰棕色“泥岩”,岩屑特征与上覆 E_2d 正常的滨浅湖相泥岩岩屑的岩性和颜色难以区分;但与下伏 E_1f^4 深灰色泥岩岩屑特征差别较大。岩心资料反映,这套地层多呈图3a所示的特殊结构岩性。②自然电位(SP)曲线呈泥岩基线,偶夹薄层微幅负异常,与 E_1f^4 泥岩无区别,同上覆 E_2d 砂泥岩段差异颇大(图4)。③自然伽马(GR)曲线较上覆 E_2d 泥岩有明显降低台阶,与 E_1f^4 泥岩相比有3种情况:多数井GR均值较 E_1f^4 略抬高,如天85井、秦3井、关1-4A井等;部分井两者接近,如瓦19井;部分井GR均值整体略降低,如河2井。④电阻率(Rt)曲线特征与图4相似,总体低Rt值,基值较 E_1f^4 泥岩略高 $0.5 \sim 3 \Omega \cdot m$,曲线呈平缓微小起幅,可夹薄层小峰;Rt曲线与上覆 E_2d 砂泥岩段明显不同,与下伏 E_1f^4 呈过渡。⑤当地层剖面处于弱-中成岩、正常压实的中浅层范围,即埋深约小于2800m时,其测井响应有特殊现象:这套地层SP、GR和Rt响应呈泥岩测井特征,声波时差AC响应特征则与上下围限泥岩AC值有明显区别,而趋近相邻的砂岩AC值(表1)。这种现象具有普遍性。但是,当埋深大于3000m,成岩压实较强烈后,AC就无这种差异了。这是岩

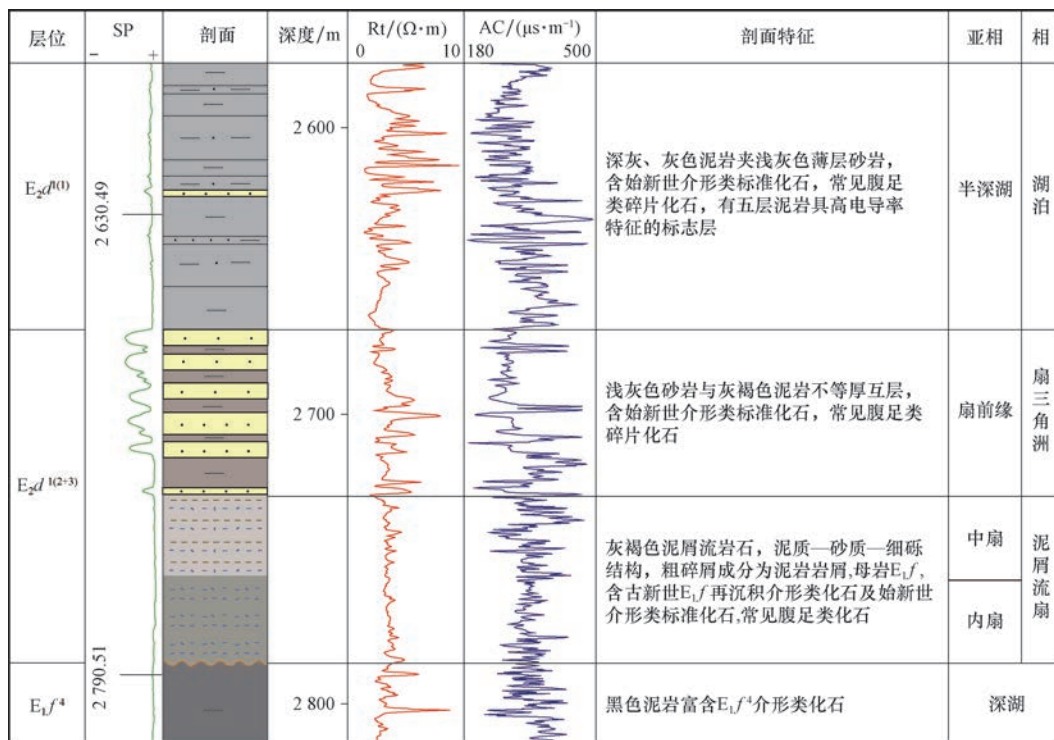


图4 苏北盆地周26井 E_2d^1 泥屑流岩剖面测井特征

Fig. 4 Logging characteristics of mud debris flow deposits of E_2d^1 in Well Zhou 26, the Subei Basin

表 1 苏北盆地高 24 井泥屑流岩与围岩测井响应对比
Table 1 Comparison of log responses between mud debris flow deposits and surrounding rock in Well Gao 24, the Subei Basin

层位	深度/m	岩性	SP/mV	GR/API	Rt/ (Ω·m)	AC/ (μs·ft ⁻¹)
E ₂ d ¹⁽²⁺³⁾	2 000	砂岩	负幅度	60	4.0~12.0	88
	2 055	泥岩		115	2.8	108~115
E ₂ d ¹⁽³⁾	2 073	泥屑流岩	泥岩 基线	86	3.8	86
E ₁ f ⁴	2 175	泥岩		90	1.1	112

石成分本质为泥质,不同粒径大小的结构因素差异消失的体现。这是一个令人意外的惊喜发现。

2 戴南组泥屑流扇特征

显然,E₂d 这套剖面是陆源泥岩风化、快速搬运、重力流沉积的,非原地撕裂或成岩形成的;但其特征与文献^[3,12-17,23-24]的重力流沉积又有差异。

2.1 泥屑流沉积概念

依支撑机理水下沉积物重力流分碎屑流(或泥石流)、颗粒流、液化流、浊流 4 种;有典型浊积岩、块状砂岩、叠覆冲刷粗砂岩、卵石质砂岩、颗粒支撑砾岩、杂基支撑的岩层和滑塌岩 7 种岩相类型^[23]。其中,水下泥石流流岩层一般含 25%~50% 杂基,分杂基支撑砾岩、杂基支撑砂砾岩和杂基支撑砂岩。

碎屑流是一种含大量弥散的粘土和粗细碎屑沉积物与水混合的粘滞塑性流^[23-24]。其中,泥质为主含粗碎屑很少的流体称泥流;由泥质包裹砂、巨石、漂砾颗

粒的流体是泥石流;基质由松散的砂、砾石组成的流体称砂质碎屑流,是泥石流与颗粒流过渡型。这里粗碎屑是中-高成熟的矿物、岩屑和岩块,不是软的泥岩岩屑。

据此概念,E₂d 这套岩石归入重力流成因的碎屑流类沉积物无疑;又与上述碎屑流的流体、岩相 3 亚类都有所差异,体现为:粗碎屑组分主要是极不稳定的砂级泥岩岩屑,石英、长石和硬岩屑的总量不足 25%。因此,本文将这种以泥质包裹大量砂粒泥岩岩屑为主的流体称作泥质碎屑流,简称泥屑流;它是碎屑流或泥石流的一种特殊成员,其岩石统称为泥屑流岩,对应的沉积相称泥屑流扇。

需要指出,前人曾描述邵伯、黄珏、肖刘庄等地区 E₂d 存在水下泥石流沉积^[3,5,8],有杂基支撑砾岩、砂砾岩,偏粗中砾级,薄-中厚层,累厚不大;这些岩石与该区大厚度、广分布的泥屑流岩孪生,说明上述分类是合理的。

2.2 泥屑流扇相识别

图 2 表明,E₂d 范围受不整合面 E₁f⁴泥岩围限,故常以泥屑流岩沉积开端,有的仅底部数米厚,不具研究意义;有的规模大,形成独立扇体。

1) 扇剖面识别

首先,以岩心观察为基础,结合古生物、薄片等化验资料,明确剖面是否属 E₂d 泥屑流岩或泥石流岩层段;然后,利用前节总结的测录井识别泥屑流岩剖面的几点认识和经验,解释出各井的泥屑流岩层段和剖面数据(图 5)。

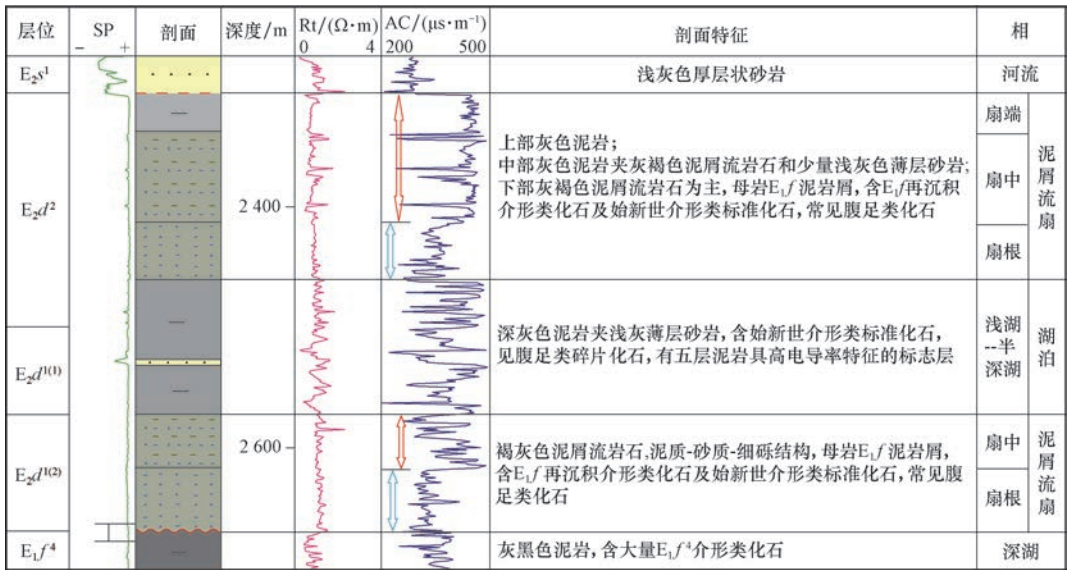


图 5 苏北盆地竹 1 井泥屑流扇单井相划分

Fig. 5 Single well facies division of mud debris flow fan in Well Zhu 1, the Subei Basin

2) 相带旋回分析

泥屑流岩的各成分本质是泥质,因此岩屑录井和测井 SP, GR, DEN, CNL, PE 等信息与正常泥岩无差异;Rt 系列有些井如图 4 所示,Rt 下部较上部略带小尖峰,呈下高上低的正旋回;有些井与图 5 一样,上、下旋回难分。

分析大量测井信息,首次发现在 E_2d 欠压实系统外、较弱压实成岩的中浅层,泥屑流岩与上下围限泥岩 AC 值差异明显。其中,短剖面泥屑流岩 AC 值全段趋近相邻砂岩 AC 值,如表 1 的高 24 井;长剖面泥屑流岩呈下段 AC 值较小、趋近砂岩 AC 值,上段 AC 值较大、趋近泥岩 AC 值,如图 5 中 $E_2d^{1(2)}$ 和 E_2d^2 有两套泥屑流扇,皆呈“下段 AC 值趋砂岩性质、上段 AC 值趋泥岩性质”的正旋回特征。

由此可见,泥屑流扇具有下粗上细的正旋回特征,以图 5 为例可以划分出扇根、扇中和扇端 3 带沉积。在邵伯等含泥石流岩层地区,则表现为泥屑流夹泥石流的混合沉积,都是正旋回建造。

3) 沉积环境讨论

由图 1 可知, $E_2d^{1(3)}$ 期泥屑流井主要分布在正常砂岩含量低的沟槽地带,即过去的“滨浅湖相”领域。根据文献^[3-8]刻画的本区正常砂岩沉积相特征,这些泥屑流扇主要与水下冲积扇、三角洲前缘、扇三角洲前缘相带毗邻,有的与短暂性泥石流沉积共生; $E_2d^{1(2)}$ 期,泥屑流扇与扇三角洲前缘、三角洲前缘为邻,同处滨浅湖区。到 E_2d^2 期,则与三角洲前缘、辫状三角洲前缘为伍。可见,本区泥屑流扇主要沉积于滨浅湖区,与介形类、腹足类反映的古生态环境吻合。

2.3 泥屑流扇分布特征

根据各井泥屑流岩解释数据,编出扇平面展布图。为突出主题,仅给出 $E_2d^{1(3)}$ 沉积相全貌, $E_2d^{1(2)}$ 和 E_2d^2 只保留泥屑流扇展布轮廓(图 6)。

平面分布规律:① E_2d 泥屑流扇发育在 11 个区块(表 2;图 6),其它地区零星见到。②扇建在断陷湖盆边界凹缘坡折区,以早期断陷长轴端、断裂凹缘区的扇厚度大。如表 2、图 6 高邮断陷西部长轴端早期在马联-黄邵,扇厚达 60~311 m;中晚期在秦栏,扇薄不足 30 m;韦-码是斜坡古地形坡折凹缘区,扇厚度明显小于断裂坡折区的此类扇。

纵向发育特点:①低位域 $E_2d^{1(2+3)}$ 、高位域 E_2d^2 各可发育一套泥屑流扇,陈-瓦、秦栏地区这两套都有,其他地区仅其中一套。② $E_2d^{1(2+3)}$ 期泥屑流扇最发育。表 2、图 6 反映 E_2d^1 早期苏北大多仍处剥蚀状态,仅金湖、高邮凹陷深凹带沉积 $E_2d^{1(3)}$,分别在 7 个区块建设大规模此类扇。 $E_2d^{1(2)}$ 期,多数这类扇演变为扇三角洲、富泥三角洲沉积,还有少数这类扇继承生长,如小关此扇总厚达 192 m。同时,随着湖盆扩张,原长轴端不断外迁,生成新的较薄泥屑流扇;仅陈-瓦地区此类扇规模较大,竹 1 井 $E_2d^{1(2)}$ 扇厚 102 m。③ E_2d^2 钻遇此类扇两处,竹 1 井厚 146 m,安 16 井厚 121 m。图 6 反映,金湖凹陷赵 1 井处于凹缘沟槽处, E_2s^1 覆于 E_1f^4 泥岩上,其底有 27 m 泥屑流岩;秦栏有多井 E_2s^1 底见泥屑流沉积,据此推测秦栏 E_2d^2 期有此类扇。④表 2 反映,各片区泥屑流扇厚度悬殊,扇厚与各自体系域总厚的占比值差异大。另外,黄邵、肖-小等片区夹有一些泥石流沉积。

3 戴南组泥屑流扇成因

陆相断陷或拗陷盆地有逢沟必扇规律,大沟是主要物源注入口和砂体发育区,长轴端(大沟)最利于建设大规模砂体;譬如,松辽盆地北部^[3]、东营凹陷东部^[11-13]、泌阳凹陷南部^[17] 皆有大型富油气砂体。但是,苏北 E_2d 断陷却例外,大沟贫砂而富泥,这是其成盆控扇因素独特耦合造成的。

表 2 苏北盆地 E_2d 泥屑流岩代表井扇厚及占比

Table 2 Thickness and percentage of mud debris flow deposits of E_2d in typical wells of the Subei Basin

地区	断陷长轴端凹缘区										断陷短轴凹缘区									
	崔庄-高集-三河			小关-墩塘			秦营-汉润		秦栏	海安	马联-黄邵			陈堡-瓦庄		周庄-徐家			肖刘-小纪	韦-码
井号	港 1	崔 2	高 7	关 1	关 3	墩 4	秦 4	东吴 1	公参 1	安 16	联 18	邵深 1	马 32	竹 1	瓦 19	周 63	周 26	肖 14	纪 3	庄 2
层位	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(2)}$	$E_2d^{1(2)}$	$E_2d^{1(2+3)}$	$E_2d^{1(2)}$	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(2)}$	$E_2d^{1(2)}$	E_2d^2	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(3)}$	E_2d	$E_2d^{1(2)}$	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(2+3)}$	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(3)}$	$E_2d^{1(2)}$
厚度/ m	95	69	12	192	76	83	77	18	10	121	310	311	119	248	42	280	55	270	29	17
占比/ %	35	47	25	81	79	44	35	17	32	100	59	54	24	83	100	60	48	57	9	100

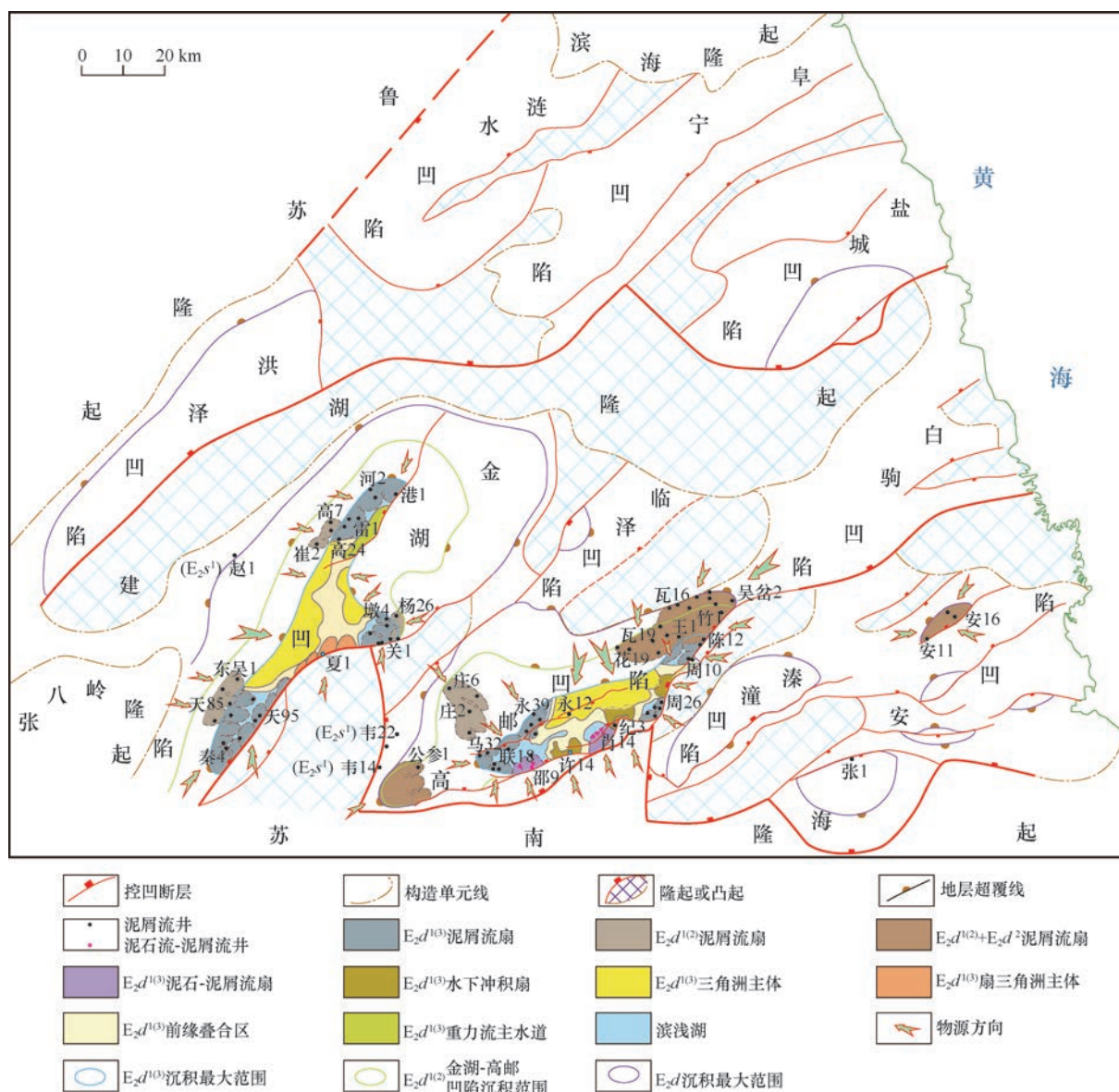


图6 苏北盆地各套泥屑流扇展布

Fig. 6 Distribution of mud debris flow fans in the Subei Basin

3.1 断陷成盆古地质背景特殊是前提

苏北 E_2d 断陷成盆古地质背景独特:①断陷有新老双层结构的“基底”。如图2、图6所示, E_2d 断陷是由下构造层统盆解体形成的一批孤立断陷群,各断陷范围都小于各自凹陷范围,即便 E_2d 最发育的高邮、金湖凹陷,在低位域早期阶段,断陷范围也仅局限深凹部分。断陷的直接“基底”是新沉积、成岩弱的下构造层,间接基底是盆地的共同基底,即中生代赤山组(K_2c)、浦口组(K_2p)和侏罗系(J)。②断陷周缘近端被 E_1f^4 巨厚泥岩露头全面围限,远端受 $K_2t-E_1f^3$ 砂泥岩露头和隆凸基岩露头包围。从下构造层各体系域残留岩相判断, K_2t-E_1f 连续沉积4期湖侵,其中 E_1f^2 、

E_1f^4 是全盆性湖侵,湖盆水体在 E_1f^4 达到鼎盛,即原始湖盆自下而上逐渐扩大,各三级层序原始沉积范围是 $K_2t < E_1f^1 < E_1f^{2+3} < E_1f^4$,但残留面积大小是 $K_2t > E_1f^1 > E_1f^{2+3} > E_1f^4$,最大湖侵 E_1f^4 高位域 $E_1f^{4(0)}$ 仅剩 50 km^2 面积^[22]。下构造层多次湖侵沉积了巨厚的泥岩,后期强烈抬升改造和剥蚀差异,形成了复杂多变的古地质露头。图2反映,盆地东北部剥蚀最强,露头为不同层位的泥岩、砂泥岩层系,呈条带或环状出露,西南部剥蚀相对少,露头是 E_1f^4 泥岩,各断陷 E_2d 沉积范围全部小于 E_1f 泥岩露头范围,尤其 $E_2d^{1(2+3)}$ 受 E_1f^4 巨厚泥岩包围;而断陷周围 E_1f^4 泥岩剥蚀线外缘,则出露着宽窄不一、抬升高低不同的 $K_2t-E_1f^3$ 砂泥岩或隆凸基岩等不同层系的露头。抬升高的断块体

露头硬老、泥岩少,呈突入断陷状;抬升越高露头越老,对应沉积的 E_2d 扇体砂岩越发育、岩性越粗。譬如图2所示,吴堡断裂带中间地段露头为 E_1f^1 砂岩层系,对应富砂的扇体,两侧地段露头为 E_1f^2 泥岩,都对应发育了泥屑流扇;又如真武断裂带许庄地区和杨村断裂带小关地区,分别是这两条边界断裂中抬升最高的地段,露头是基底侏罗系安山质火山岩、火山角砾岩,许庄还有古生界碳酸盐岩,成为苏北盆地边界断裂唯一见砂砾岩体的2个区块。相反,抬升低的断块体露头地层新、富泥岩,露头成岩性差、不稳定,容易在断陷边界形成凹缘状,对应沉积 E_2d 泥屑流扇或富泥扇体。

3.2 独特的双物源供给是物质基础

E_2d 物源供给相当独特:①有 $K_2t - E_1f$ 新岩系、基底老岩系两套物源,新老双源互为消长。断陷早期古地貌差大,新岩系优先剥蚀 E_1f 上部巨厚泥岩供给大量砂级陆屑;随着湖盆扩张,断陷周缘地势差变小,新岩系剥到下部砂泥岩系,老岩系供给则显著增加,形成泥屑流岩条件逐渐衰亡。②新岩系有两种物源供给模式,抬升相对较低的断块体露头以 E_1f 上部泥岩主源,抬升相对较高的断块体露头以 E_1f 下部砂泥岩主源。新老双源供给,砂泥此消彼长格局,深刻影响了 E_2d 扇相类型、砂体建设与展布。③断陷早期,以泥岩为主、砂岩为次的新物源影响强烈,低位域期普遍匮乏粗粒物源,尤其大规模砾石、粗砾石缺乏,导致砾岩普遍不发育。断陷晚期,随着湖盆扩大、水体变浅,断陷边界与外缘老露头的距离缩小,粗碎屑物源供给充分,新物源 E_1f 泥岩影响小,到 E_2d^2 砂岩含量显著增高,部分凹缘坡折富泥的沉积现象也逐渐消失。

3.3 构造活动差异引起沉积作用分化

E_2d 期构造活动既强烈又差异,制约着断陷沉积:①构造沉降极不均衡,形成不同可容空间断陷,沉积差异显著(表3)。高邮、金湖凹陷可容空间大,泥屑流扇发育;其他凹陷沉降晚、幅度小,甚至无沉降,此扇不发育。②沉降速率总体较小,沉积补偿快,断陷水体浅,稳定湖泊短暂,砂岩发育,尤其 E_2d^2 。③构造活动形成不同的古地貌坡折带,高低露头不同砂泥含量的物

源供给,进而控相控砂。

3.4 两种搬运输送体系建设多样扇体

E_2d 沉积水体搬运方式有牵引流、重力流,受双重物源此起彼伏影响,形成了陆源组分多样、含量多变的沉积物流态;尤其 $E_2d^{1(2+3)}$ 重力流体系,在陡坡断裂带、缓坡侵蚀突变带沿岸,处处见其踪影,形成丰富的泥屑流扇、水下冲积扇、扇三角洲等。输送体系既影响物源注入口道、扇生长位置,也控制扇相类型演化、砂体规模及展布格局。

3.5 坡折带特征控制各种扇生长

苏北 E_2d 断陷边缘坡折带,按成因、剖面结构、平面形状及与物源关系,可分成3类6种(表4)。这里平面形状系指断陷湖盆边缘平面形态,边缘向湖区凸进的叫凸缘坡折;向物源区凸进的叫凹缘坡折(即沟槽),如断陷长轴端属凹缘坡折。

研究表明,苏北 E_2d 断陷沉积仍遵循陆相盆地普遍规律。只是前人未识出凹缘坡折的泥屑流岩,误作滨浅湖泥岩。事实上,图1、图6反映 E_2d 沉积既有沟扇关系规律,又有独自特点(表5):①凹缘坡折极富新物源泥岩粗-细陆屑,建设泥屑流扇和多种富泥的扇,其正常砂岩含量一般小于10%^[25]。②凸缘坡折也有扇,并受基岩物源影响大,新物源砂岩也颇丰,沉积多种较富砂到极富砂的扇,其正常砂岩含量多高于20%, E_2d^2 许多扇的砂岩含量高达50%~95%^[25]。这一控扇定砂规律,在苏北盆地主力油区高邮凹陷 E_2d 、金湖凹陷 E_2d^1 十分突出。

由此可见,古地质背景、双重物源、构造作用、输送方式及坡折带特征耦合,共控 E_2d 扇生长位置、相类型、时空展布及砂体规模,形成具苏北盆地 E_2d 断陷特色的物源-坡折-扇相-砂体对应规律。这些新认识很好地支撑着油田 E_2d 隐蔽油藏勘探持续发展,回答了渤海湾盆地断陷沉积模式不适用苏北盆地的原因。

4 结论

1) 苏北盆地 E_2d 断陷在低位域、高位域发育一种

表3 苏北盆地各凹陷 E_2d 最大厚度对比

Table 3 Comparison of the maximum thickness of E_2d in each sags of the Subei Basin

凹陷	金湖	高邮	临泽	溱潼	海安	白驹	盐城	阜宁	涟水	洪泽
最大厚度/m	1 200	1 700	120	550	300	0	265	0	0	950

表 4 苏北盆地 E₂d 断陷边缘坡折带类型

Table 4 Slope break zone types of E₂d fault depression edges in the Subei Basin

大类	凸缘坡折亚类	凹缘坡折亚类
陡坡断裂坡折	高抬断阶陡坡断裂带凸缘坡折(真许型,小纪型)	低抬断阶陡坡断裂带凹缘坡折(邵伯型)
	—	(低抬)陡坡断裂-缓坡侵蚀带凹缘坡折 (陈堡-瓦庄型,小关型)
缓坡侵蚀坡折	靠老山缓坡侵蚀带凸缘坡折(沙埝型)	靠新山缓坡侵蚀带凹缘坡折(韦-码型)
缓坡断裂坡折	—	靠新山洼陷边缘断裂带凹缘坡折(马联型,三河型)

表 5 苏北盆地 E₂d 断陷物源-坡折-扇相关系

Table 5 Relationship of provenance, slope break zone and fan facies of E₂d in the Subei Basin

层位	陡坡断裂带或缓坡侵蚀带——凸缘坡折		陡坡断裂带或缓坡侵蚀带——凹缘坡折	
	物源特征	主要扇相类型	物源特征	主要扇相类型
E ₂ d ² (HST)	基岩为主, 有 E ₁ f-K ₂ t 砂泥岩	富砂辫状三角洲、较富砂扇三角洲	较富 E ₁ f 砂泥岩	富泥扇三角洲、富泥三角洲、少量泥屑流扇
E ₂ d ¹⁽¹⁾ (TST)		较富砂扇三角洲、富砂三角洲		富泥三角洲、富泥扇三角洲
E ₂ d ¹⁽²⁾ (LST)	基岩为主, E ₁ f 砂泥岩次之	较富砂扇三角洲、富砂三角洲	极富 E ₁ f 泥岩	富泥三角洲、泥屑流扇
E ₂ d ¹⁽³⁾ (LST)		较富砂水下冲积扇、较富砂三角洲		泥屑流扇、泥石-泥屑流扇

由下构造层 E₁f 泥岩供源的泥屑流沉积岩,岩石宏微观、古生物和测录井特征与众不同,属重力流中很特殊的一种泥屑流流体沉积产物。

2) E₂d 断陷成盆独特古地质背景、新老双物源、大套 E₁f 泥岩围限 E₂d、构造强烈差异作用、重力流-牵引流多种流态及与坡折带特征耦合,共控了 E₂d 沉积,呈现凹缘坡折发育泥屑流扇、富泥扇,凸缘坡折建设富砂扇的独特“物源-坡折-扇相-砂体”关系规律,成为预测 E₂d 隐蔽圈闭发育分布的重要理论,有效地指导了勘探生产工作。

参 考 文 献

[1] 刘玉瑞. 苏北后生-同生断陷盆地油气成藏规律研究[J]. 石油实验地质, 2016, 38(6): 721-731.
Liu Yurui. Petroleum accumulation rules in hystrogenetic reconstructive-syngenetic rift basins, North Jiangsu Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(6): 721-731.

[2] 刘玉瑞. 论苏北后生-同生断陷盆地性质[J]. 复杂油气藏, 2017, 10(1): 1-8.
Liu Yurui. Study on characteristics of hystrogenic reconstructive and syngenetic rift basins in Subei Basin[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2017, 10(1): 1-8.

[3] 吴崇筠, 薛叔浩. 中国含油气盆地沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 1992.
Wu Chongyun, Xue Shuhao. The sedimentology of petroliferous basins in China[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1992.

[4] 张喜林, 朱筱敏, 钟大康, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及其对隐蔽油气藏的控制[J]. 古地理论, 2005, 7(2):

207-217.
Zhang Xilin, Zhu Xiaomin, Zhou Dakang, et al. Sedimentary facies and its controlling on subtle oil and gas reservoirs of the Dainan Formation of Paleogene in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2005, 7(2): 207-217.

[5] 邱旭明, 刘玉瑞, 傅强. 苏北盆地上白垩统-第三系层序地层与沉积演化[M]. 北京: 地质出版社, 2006.
Qiu Xuming, Liu Yurui, Fu Qiang. Sequence stratigraphy and sedimentary evolution of Upper Cretaceous-tertiary in Subei Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006.

[6] 高丽坤, 林春明, 姚玉来, 等. 苏北盆地高邮凹陷古近系戴南组沉积相及沉积演化[J]. 沉积学报, 2010, 28(4): 706-715.
Gao Likun, Lin Chunming, Yao Yulai, et al. Sedimentary facies and evolution of Paleogene Dainan Formation in Gaoyou Sag, Subei Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(4): 706-715.

[7] 纪友亮, 王勇, 李清山, 等. 高邮凹陷古近系戴南组一段物源分析[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.

[8] 董桂玉, 邱旭明, 刘玉瑞, 等. 陆相复杂断陷盆地隐蔽油气藏砂体预测[M]. 北京: 石油工业出版社, 2013.
Dong Guiyu, Qiu Xuming, Liu Yurui, et al. Sand-exploring for the subtle reservoirs of continental and complex-rift basins, for Gaoyou Sag, Subei Basin[M]. Beijing, Petroleum Industry Press, 2013.

[9] 王英民, 金武弟, 刘书会, 等. 断陷湖盆多级坡折带的成因类型、展布及其勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2003, 24(3): 199-203.
Wang Yingmin, Jin Wudi, Liu Shuhui, et al. Genetic types, distribu-

- tion and exploration significance of multistage slope breaks in rift lacustrine basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2003, 24(3): 199–203.
- [10] 朱筱敏, 康安, 王贵文. 陆相拗陷型和断陷型湖盆层序地层样式探讨[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 283–287.
- Zhu Xiaomin, Kang An, Wang Guiwen. Sequence stratigraphic models of depression and faulted-down lake basins[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 283–287.
- [11] 张善文. 济阳拗陷第三系隐蔽油气藏勘探理论与实践[J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27(6): 731–740.
- Zhang Shanwen. Exploration theory and practice of the Tertiary subtle reservoirs in Jiyang Depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27(6): 731–740.
- [12] 朱筱敏, 张守鹏, 韩雪芳, 等. 济阳拗陷陡坡带沙河街组砂砾岩体储层质量差异性研究[J]. *沉积学报*, 2013, 31(6): 1094–1104.
- Zhu Xiaomin, Zhang Shoupeng, Han Xuefang, et al. On the differences of reservoir quality of Shahejie Fm. in steep slope zones of Jiyang Sag[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(6): 1094–1104.
- [13] 宋国奇, 郝雪峰, 刘克奇. 箕状断陷盆地形成机制、沉积体系与成藏规律[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(3): 303–309.
- Song Guoqi, Hao Xuefeng, Liu Keqi. Tectonic evolution, sedimentary system and petroleum distribution patterns in dustpan-shaped rift basin: a case study from Jiyang Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(3): 303–309.
- [14] 张亚雄, 董艳蕾, 成克男, 等. 黄骅拗陷沙河街组一段碎屑岩沉积特征及构造对沉积的控制作用[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(6): 975–984.
- Zhang Yaxiong, Dong Yanlei, Cheng Kenan, et al. Depositional characteristics and tectonic control on sedimentation of the 1st Member of Shahejie Formation in Huanghua Depression, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(6): 975–984.
- [15] 刘军鐸, 解习农, 孟涛, 等. 沾化凹陷埕南北部陡坡带深层扇体控砂机理及储层评价[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 122–127.
- Liu Jun, Xie Xinong, Meng Tao, et al. Mechanism of sand-control and quantitative evaluation of reservoir effectiveness in the northern steep slope of Chengnan area in the Zhanghua Sag[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 122–127.
- [16] 张亚雄, 朱筱敏, 陈欢庆, 等. 琼东南盆地渐新统陵水组坡折带类型及层序地层样式[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 473–479.
- Zhang Yaxiong, Zhu Xiaoming, Chen Huanqing, et al. Slope-break types and sequence stratigraphic styles of the Oligocene Lingshui Formation in Qiongdongnan Basin, South China Sea[J]. *Oil & Gas Geology*, 2014, 35(4): 473–479.
- [17] 董艳蕾, 朱筱敏, 耿晓洁, 等. 泌阳凹陷东南部核桃园组近岸水下扇与扇三角洲沉积特征比较及控制因素分析[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(2): 271–279.
- Dong Yanlei, Zhu Xiaoming, Geng Xiaojie, et al. Sedimentary characteristics comparison and controlling factors analyses of nearshore subaqueous fan and fan delta in the Hetaoyuan Formation of southeastern Biyang Sag[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(2): 271–279.
- [18] 高红灿, 肖斌, 郑荣才, 等. 白音查干凹陷下白垩统腾格尔组砾质滩坝沉积特征[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(4): 612–620.
- Gao Hongcan, Xiao Bin, Zheng Rongcai, et al. Sedimentary characteristics of gravelly beach-bar in the Lower Cretaceous Tenggeer Formation of Baiyinchagan Sag, Erlian Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(4): 612–620.
- [19] 裴健翔, 董贵能, 朱其. 北部湾盆地涠西南凹陷流一段强制湖退沉积体的特征及其油气地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(4): 520–527.
- Pei Jianxiang, Dong Guineng, Zhu Qi. Characteristics and petroleum geological significance of lacustrine forced regressive deposits in the 1st Member of Liushagang Formation in Weixinan Sag, Beibuyan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(4): 520–527.
- [20] 魏巍, 陆永潮, 刘中戎, 等. 西藏伦坡拉盆地牛堡组层序地层与沉积充填模式[J]. *石油实验地质*, 2017, 39(1): 32–40.
- Wei Wei, Lu Yongchao, Liu Zhongrong, et al. Sequence stratigraphic framework and sedimentary model of Niubao Formation in Lunpola Basin, central Tibet[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2017, 39(1): 32–40.
- [21] 徐长贵, 杜晓峰, 徐伟, 等. 沉积盆地“源—汇”系统研究新进展[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(1): 1–11.
- Xu Changgui, Du Xiaofeng, Xu Wei, Qi, et al. New advances of the “Source-to-Sink” system research in sedimentary basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(1): 1–11.
- [22] 刘玉瑞. 苏北后生断陷阜四段高位域的发现及其意义[J]. *复杂油气藏*, 2011, 4(2): 9–13.
- Liu Yurui. Discovery and significance of E₁f₄ highstand systems tracks in Subei epigenetic-faulted Basin[J]. *Complex Hydrocarbon Reservoirs*, 2011, 4(2): 9–13.
- [23] 姜在兴. 沉积学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010.
- Jiang Zaixing. *Sedimentology*[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010.
- [24] 袁静, 王冠民, 徐方建, 等. 沉积学原理[M]. 北京: 地质出版社, 2013.
- Yuan Jing, Wang Guanjin, Xu Fangjian, et al. *Principles of sedimentology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2013.
- [25] 刘玉瑞. 苏北盆地高邮凹陷戴南组物源—坡折控扇研究[J]. *石油实验地质*, 2016, 38(1): 23–31.
- Liu Yurui. Sediment sources and slope belt controlling fan systems in Dainan Formation in Gaoyou Sag, North Jiangsu Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2016, 38(1): 23–31.

(编辑 张亚雄)