

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2019.025>



# 西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源—汇系统差异性及其耦合模式

蔡 华, 秦兰芝, 刘英辉

中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200335

**摘要:**为了推进西湖凹陷平北斜坡带岩性油气藏领域的勘探进程,厘清岩性体发育模式和分布规律,基于最新钻井、薄片、重矿物及覆盖全区的高精度三维地震资料,精细刻画西湖凹陷平北斜坡带源—汇系统单元,探讨构建了不同物源供给、地形格局和潮汐改造背景下源—汇系统耦合模式及其差异性。通过重矿物组分与岩屑分析,明确物源区物源组分、方向及供给强度;利用测井与岩心、地震相和多属性聚类分析明确潮汐改造作用在沉积物分布和演化上的响应。结合古地貌形态和断裂活动性,定量—半定量分析源—汇系统各单元要素间相关性,明确物源供给、地形格局和潮汐作用控制下源—汇系统耦合模式及其差异性,分别构建低物源供给—单断—潮汐改造型耦合模式、中等物源供给—古隆起与反向断阶—河控—潮控型耦合模式和高物源供给—同向断阶—河控—潮控型耦合模式。据此指出各源—汇系统内沉积体展布成因及规律,有效指导海陆过渡相背景下有利储集目标预测,为类似地质背景下油气勘探提供思路与技术方法支持。

**关键词:**源—汇系统;西湖凹陷;平湖组;海陆过渡相;多属性聚类;石油地质。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2019)03-0880-18

收稿日期: 2019-02-21

## Differentiation and Coupling Model of Source-to-Sink Systems with Transitional Facies in Pingbei Slope of Xihu Sag

Cai Hua, Qin Lanzhi, Liu Yinghui

Shanghai Branch of CNOOC Ltd., Shanghai 200335, China

**Abstract:** In order to promote the exploration process of lithologic hydrocarbon reservoir in Pingbei slope of Xihu Sag and to clarify the development mode and distribution law of lithologic sand body, a comprehensive study is presented in this paper, based on the analyses of the latest drilling, thin sections, heavy minerals and high-resolution 3D seismic data of Pingbei slope in the Xihu Sag, East China Sea. The analyses of heavy mineral composition and debris show the components, orientation, and supply strength of the provenance. In addition, the analyses of logging and cores, the seismic facies and multi-attribute reveal the tidal transformation mechanism in the distribution and evolution of sediments. On the basis of quantitative and semi-quantitative analysis of various elements of Source-to-Sink (S2S) systems correlation combined with the paleogeomorphology and faults, the coupling differences of S2S systems under the control of provenance supply and tidal action are clarified. The results show that low provenance supply-single stage fault-tidal control, intermediate provenance supply-paleo-uplift and reverse step faults-river-tidal control, and high provenance supply-consequent step faults-river-tidal control coupling models are established. On this basis, the sedimentary distribution cause and law of each S2S system are systematically discussed. The establishment of different coupling models of S2S systems can provide the key directions of petroleum exploration. In addition, this study also provides reference methods and ideas for the research of S2S systems under different geological backgrounds.

基金项目:国家科技重大专项(No.2016ZX05027001)。

作者简介:蔡华(1966—),女,教授级高工,长期从事油气田开发综合研究工作。ORCID:0000-0002-4968-1068. E-mail: caihua@cnooc.com.cn

引用格式:蔡华,秦兰芝,刘英辉,2019.西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源—汇系统差异性及其耦合模式.地球科学,44(3): 880—897.

**Key words:** Source-to-Sink (S2S) system; Xihu Sag; Pinghu Formation; transitional facies; seismic multi-attribute; petroleum geology.

源—汇系统(Source-to-Sink system,简称 S2S)是剥蚀地貌和沉积地貌被沉积物搬运路径联系在一起,共同构成的统一整体(Allen and Hovius, 1998; Allen, 2005, 2008; Sømme *et al.*, 2009, 2013; Sømme and Jackson, 2013; 刘强虎等,2016; 朱红涛等,2017),其研究的核心是地球动力学过程分析以及多学科交叉融合的研究方法探索(朱红涛等,2017, 2018).源—汇系统以剥蚀、搬运、沉积为重点,将物源区(剥蚀区)地貌和构造作用、搬运区(过路区)搬运方式以及沉积区沉积物堆积样式、沉积展布范围等划分为数个重点单元并有机结合为一个完整的系统,基于对地球动力学过程、深时古气候、古水系重建和沉积盆地恢复等研究过程,来指导相应地质事件的预测和有利砂岩储集体的分布(刘强虎等,2016,2017).

目前源—汇系统的研究主要集中在两个方面,一是洋陆边缘源—汇系统研究,主要侧重于物质通量守恒控制下的物源类型、供给强度与沉积区的耦合研究,强调一个大尺度整一的源—汇系统内多个物源与沉积区的定量—半定量耦合(Allen, 2005, 2008);另一方面是陆相盆地内源—汇系统研究,主要针对不同地貌和断裂背景下源—汇系统物源供给与沉积响应的定量—半定量研究,强调地质背景对源—汇系统的控制作用(朱红涛等, 2009, 2010, 2013, 2016).海陆过渡背景下的源—汇系统研究是在洋—陆边缘源—汇系统的框架之下,结合部分陆相盆地源—汇研究优势,不仅仅满足于单独的源—汇系统物源和沉积单一耦合,同时在大的宏观层面更进一步考虑地貌和沉积演化背景,对不同微地貌和断裂背景下的多个次级源—汇系统进一步进行深入和细化的研究,明确不同源—汇系统控制洋—陆边缘沉积体展布规律和成因分析,海陆过渡背景下的源—汇系统分析是洋—陆边缘源—汇系统研究的进一步细化和探索.东海西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡带源—汇系统单元存在非常明显的差异性,主要表现在:(1)物源区存在不同源—汇系统母岩类型、沉积物供给强度和搬运通道等差异;(2)沉积区存在地貌和断裂发育样式、潮汐—河流作用强弱等差异.同时,东海西湖凹陷平北斜坡带始新世平湖组为陆架盆地发育的海陆过渡地层,作为油气勘探和开发的重点层段,近年来随着该地区勘探程度进一步增大,大量的物源和沉积信息被揭示,是开展海陆过渡

盆地源—汇系统研究的理想载体和研究对象.

## 1 区域地质概况

西湖凹陷处于东海陆架盆地东北部,为新生代时期发育起来的呈 NNE 向狭长型盆地,南北长约 500 km,东西平均宽约 130 km,面积约为  $5.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,是东海陆架盆地中规模最大的古近系和新近系富烃凹陷(蔡华和张建培, 2013; 杨彩虹等, 2013; 蔡华等, 2014; 段冬平等, 2015; 高伟中等, 2015).西湖凹陷西侧自北向南依次与虎皮礁隆起、长江凹陷、海礁隆起、钱塘凹陷和渔山东隆起等构造单元相接,东部与钓鱼岛褶皱带相邻,南部与钓北凹陷、福江凹陷相邻.在构造格局上其具有东西分带、南北分块、纵向上多构造叠合的基本特征(胡望水等, 2010; 周心怀等, 2010; 张绍亮等, 2014).西湖凹陷内部分为 3 个构造带,由西向东依次为西部斜坡带、中央洼陷—反转构造带和东部断阶带(图 1a).

平北斜坡带位于西湖凹陷西部斜坡带中上段,西部紧邻海礁隆起(图 1b),处于平湖斜坡带北部,面积约  $1600 \text{ km}^2$ (图 1c);由老到新依次发育前平湖组,古近系始新统平湖组( $E_2 p$ )、渐新统花港组( $E_3 h$ ),新近系中新统龙井组( $N_{11} l$ )、中新统玉泉组( $N_{12} y$ )、中新统柳浪组( $N_{13} l$ )、上新统三潭组( $N_{2s}$ )以及第四系东海群(Qpdh)(图 2).平湖组由老到新又发育  $E_2 \text{PSQ I}$ 、 $E_2 \text{PSQ II}$  和  $E_2 \text{PSQ III}$  三个三级层序,其中  $E_2 \text{PSQ I}$  层序对应于海平面较低的富砂层序, $E_2 \text{PSQ II}$  层序对应于整体海平面升高的富泥层序和  $E_2 \text{PSQ III}$  层序对应于海平面降低的富砂层序(张建培等, 2012, 2013).

受太平洋板块俯冲影响,东海盆地开始弧后挤压,同时受到菲律宾板块的挤入,东海盆地发生多幕挤压反转,东海盆地整体发育局限海沉积背景(任建业等, 1998; 袁伟等, 2014).在这种局限海背景之下海水的涌入使得东海盆地潮汐作用为主的三角洲较为发育,同时由于平湖组沉积时期处于断坳转换期,早期局限海背景逐渐演变为封闭陆相湖盆,平湖组晚期河控三角洲广泛发育于东海陆架西部斜坡带.前人研究也表明,西湖凹陷平北斜坡带在海陆过渡区斜坡背景下,在平湖组时期整体处于海陆过渡、河潮共控的沉积背景,无显著浪控作用标志,整体发育

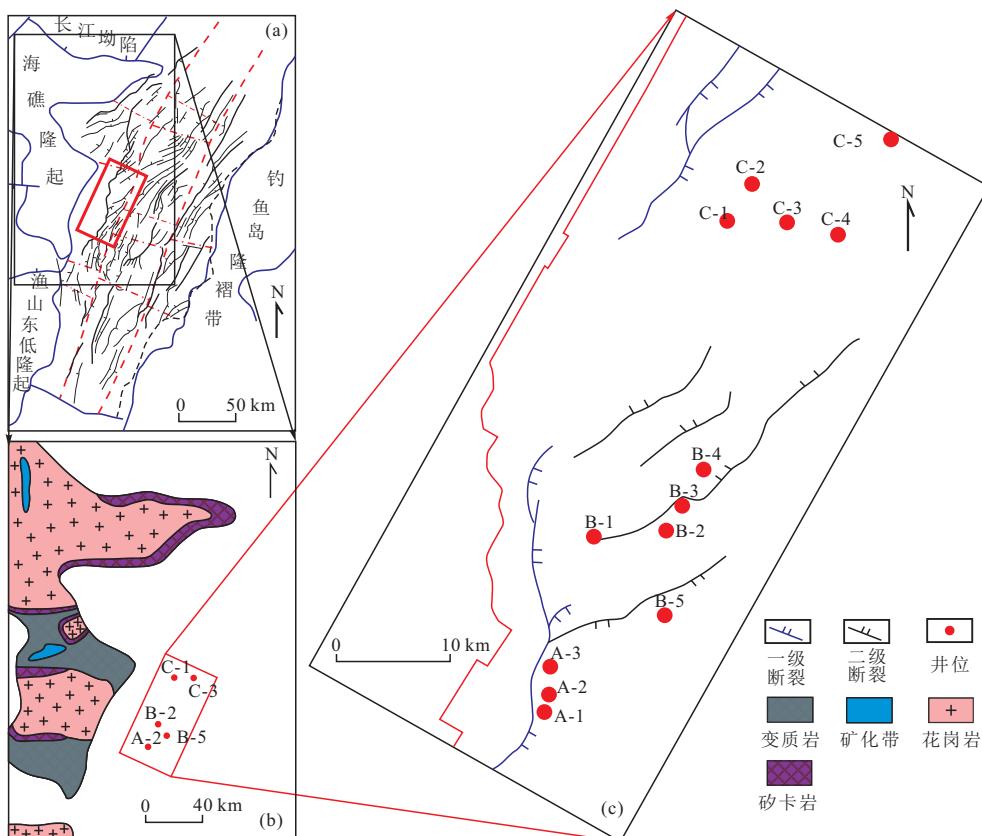


图 1 区域构造特征(a)、基岩分布(b)及研究区断裂与井位分布(c)

Fig.1 Regional tectonic characteristics (a), bedrock distribution (b) and faults and well location distribution (c)

潮汐—河流沉积体系(陆俊泽等,2009;秦兰芝等,2017;于兴河等,2017).

## 2 源—汇系统单元划分及特征

东海西湖凹陷平北斜坡带海陆过渡相源—汇系统单元存在明显的差异性。基于平北地区断裂特征、物源供给、地貌、沟谷水系等差异,笔者将平北地区划分为 3 个源—汇系统:A 区断裂陡坡源—汇系统,B 区缓坡低隆对向型源—汇系统和 C 区缓坡正向多级断阶型源—汇系统(图 3)。根据地貌单元、沉积体分布规律,研究区由陆向盆方向依次被划分出 4 个源—汇系统单元:沟谷水道相对发育的搬运带、沉积基准面垂向迁移的斜坡带、断裂最为发育且地形相对平缓的第一坡折带和断裂不发育且地形坡度大的第二坡折带(图 3)。其中搬运带为物源供给区,斜坡带为剥蚀区和沉积区的过渡区带,第一坡折带和第二坡折带位于沉积区内。

### 2.1 物源区特征

物源是沉积区沉积体堆积的重要影响因素,直

接控制了沉积区沉积物的种类和沉积体规模。平北地区物源主要来自于与其搬运距离最近的海礁隆起和早期自身基底提供的物源,受火成岩侵入作用的影响,对应于平北地区的海礁隆起基底物源呈现出南北两端以变质岩为主、中部以火成岩为主,以及夹杂在火成岩和变质岩中间少量的砂卡岩(图 1)(吴嘉鹏等,2017)。

(1)重矿物组成:一定程度上反映了源区物源搬运强度和物源类型,揭示了不同源区不同岩性的基底对沉积区的供源强度(武法东等,1996)。

A 区主要重矿物组合为锆石+石榴石+白钛矿,其中锆石与白钛矿来源于火成岩物源,石榴石来源于变质岩。A 区石榴石在重矿物组分中的含量最高,达到了 43.67%(图 3);通过分析不同重矿物组分含量,笔者认为 A 区沉积物来源主要由海礁隆起南部变质岩提供,火成岩基底同样具有一定的供源作用。B 区重矿物组合为赤褐铁矿+白钛矿+石榴石,其中赤褐铁矿含量最高为 20.48%,白钛矿含量为 13.95%(图 3),二者来源为中基性岩浆岩,物源主要来自于源区火成岩基底;C 区重矿物组分为石

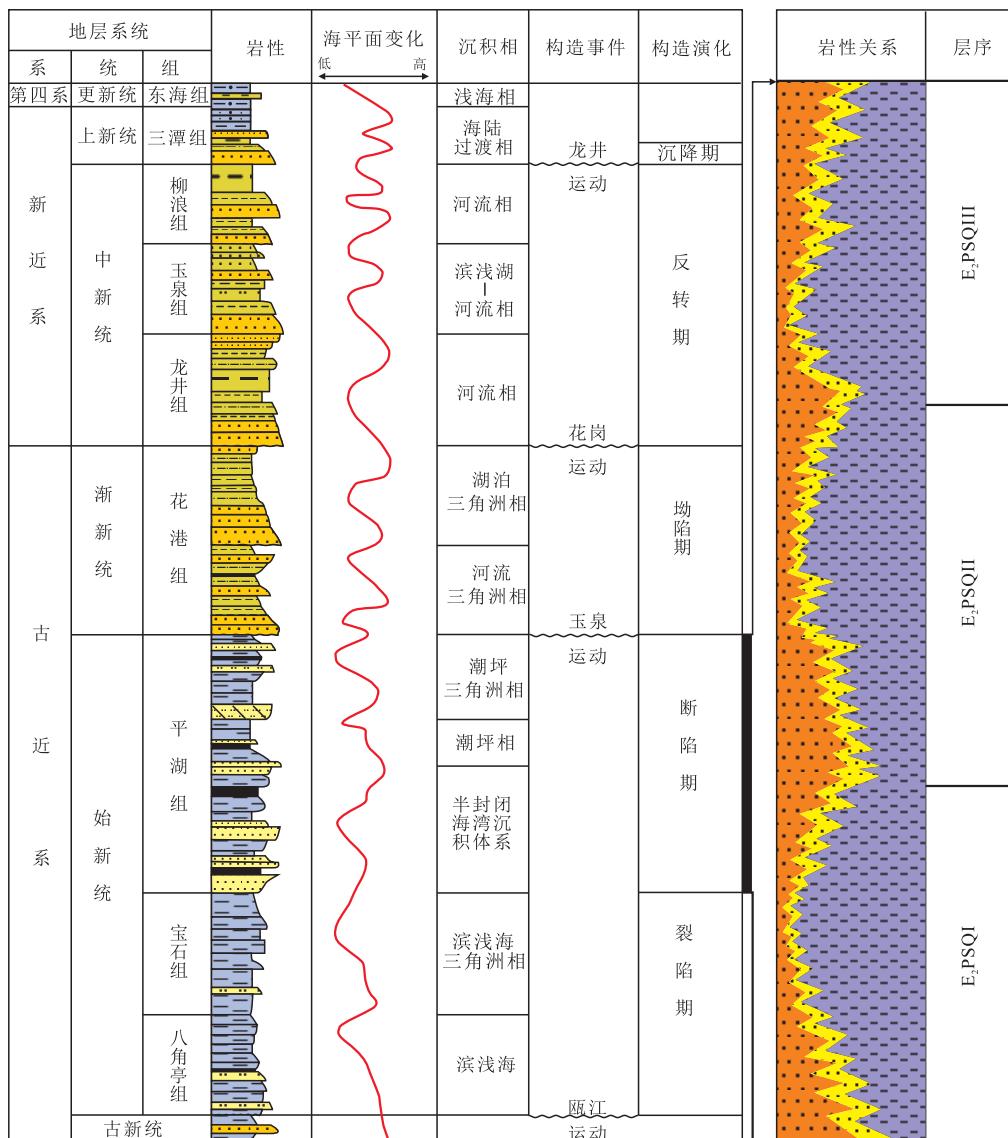


图2 西湖凹陷新生代地层综合柱状图及平湖组三级层序地层单元

Fig.2 Comprehensive column of Cenozoic strata and third-order sequence stratigraphic unit of the Pinghu Formation in the Xihu Sag

榴石+白钛矿+锆石组合,其中石榴石含量最高达到57.97% (图3),示踪为海礁隆起变质岩基底供源。

(2) 岩屑组成:作为提供沉积物来源的岩石类型的直接标志,在一定程度上反映了源区物源的组成特征(刘强虎等,2015;朱红涛等,2017)。

根据钻井岩心和岩屑观察以及镜下薄片观察,A区沉积岩岩屑组成主要以变质岩岩屑为主,部分火成岩岩屑;变质岩岩屑主要以多晶石英为主,火成岩岩屑主要以辉长岩为主(图4a~4c);B区主要以火成岩岩屑为主,主要为凝灰岩岩屑和辉长岩岩屑(图4d~4f);C区主要以变质岩岩屑为主,主要以多晶石英和片岩为主,具交代变晶结构(图4g~4i)。

(3) 物源通道特征:海礁隆起物源经搬运带沟谷通道向盆地中心迁移,向陆侧水流侵蚀作用强烈,下切谷继承性发育,且分支水系分布密集,为物源的注入提供了稳定通道;在向盆地中心迁移过程中,水流下切作用减弱,沟谷逐渐汇聚,沟谷形态逐渐发生变化。

搬运带是沟谷和断槽的主要发育区,是沉积区物源输导和汇聚的主要载体,通道对沉积物搬运差异主要体现在两个方面:一是沉积物输导方向的差异,不同搬运通道对输送沉积物方向存在显著差异;二是在沉积物搬运通量上,不同的搬运通道输送的沉积物总量存在显著区别。基于这两个方面的原因,

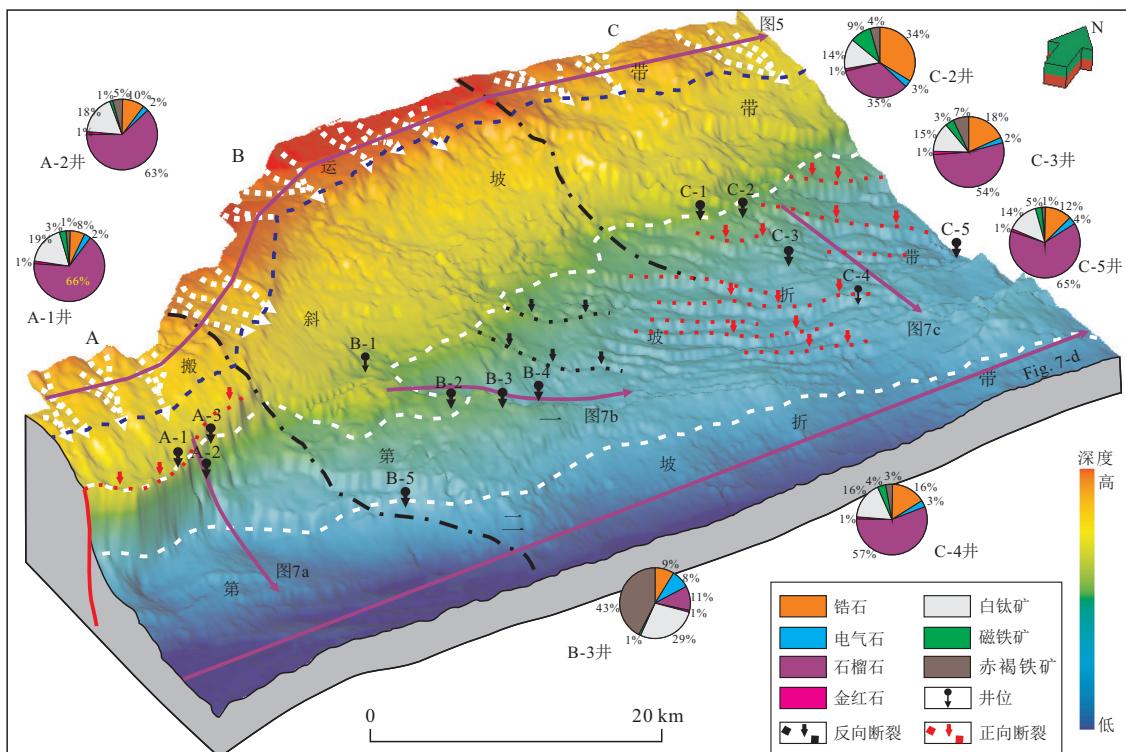


图 3 西湖凹陷平北斜坡带平湖组源—汇地貌单元划分及重点井重矿物组成分布

Fig.3 Division of S2S systems and distribution of heavy minerals in the Pinghu Formation, Pingbei slope of the Xihu Sag

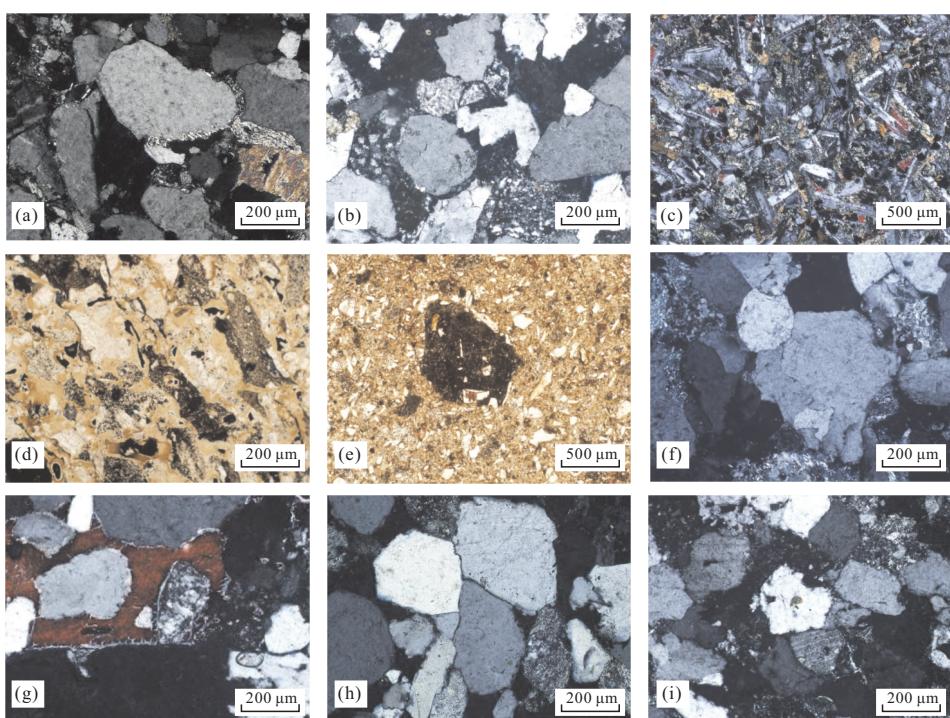


图 4 西湖凹陷平北斜坡带平湖组不同源—汇单元重点井岩屑组成及差异

Fig.4 Differences of cutting compositions under different S2S systems in the Pinghu Formation, Pingbei slope of the Xihu Sag  
a. A-1 井, 3 509 m, E<sub>2</sub>PSQII, 正交偏光, 变质岩岩屑; b. A-1 井, 3 325 m, E<sub>2</sub>PSQI, 正交偏光, 变质岩岩屑; c. A-3 井, 3 239 m, E<sub>2</sub>PSQII, 正交偏光, 火成岩岩屑; d. B-1 井, 3 810 m, E<sub>2</sub>PSQIII, 单偏光, 火成岩岩屑; e. B-1 井, 3 815 m, E<sub>2</sub>PSQIII, 单偏光, 凝灰岩岩屑; f. B-3 井, 4 203 m, E<sub>2</sub>PSQI, 正交偏光, 火成岩岩屑; g. C-3 井, 4 202.77 m, E<sub>2</sub>PSQII, 正交偏光, 变质岩岩屑; h. C-3 井, 4 202.77 m, E<sub>2</sub>PSQII, 正交偏光, 变质岩岩屑; i. C-5 井, 4 471.8 m, E<sub>2</sub>PSQIII, 正交偏光, 变质岩岩屑

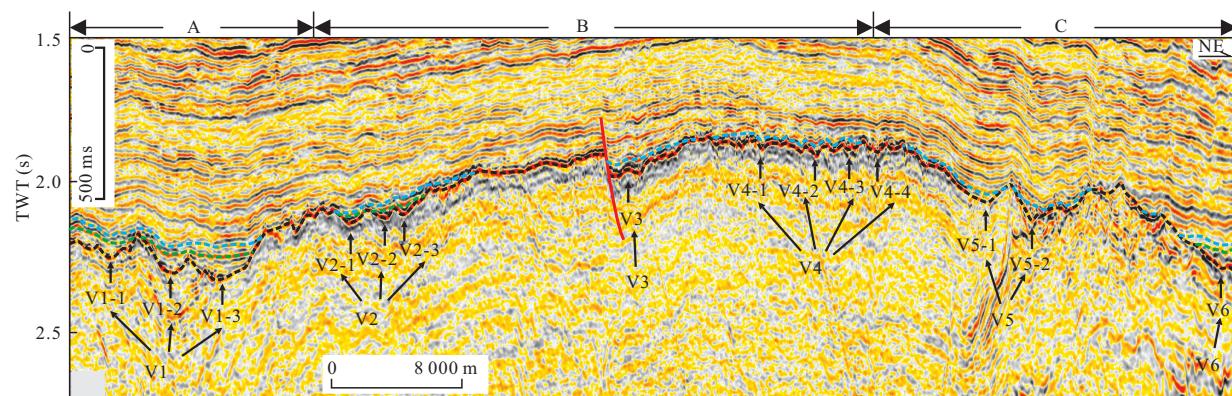


图5 西湖凹陷平北斜坡带平湖组不同源—汇单元物源搬运通道地震剖面

Fig.5 Sediment transport pathways of various S2S systems in the Pinghu Formation, Pingbei slope of the Xihu Sag  
剖面位置见图3

以主物源方向为通道划分的一级单元,将所有汇入同一沉积区域的物源通道归于一个主物源方向;以主物源方向所涵括的物源通道为二级单元。以此建立不同源—汇单元的搬运体系进行探讨,将不同源—汇单元内部搬运通道沉积物总量和优势堆积方向区别开来。笔者通过对主物源方向定量拾取,物源搬运通道的宽度、深度、宽深比和横截面积进行计算,综合判定其物源强弱和搬运沉积通量,宽深比小指示物源供给强,搬运强度大,通道下切程度大;反之则物源供给弱,通道下切程度小。

平湖组发育时期,海礁隆起物源整体经斜坡带由西北向东南方向搬运,汇入沉积区,但在不同沉积单元内部,物源方向和通道规模等存在较大差异(图5,表1)。

A区源—汇系统沉积物主要由物源搬运通道V1搬运至沉积区,V1主物源通道方位角(通道起始点至消亡终止点)为 $130^{\circ}$ ;主物源通道内又发育3个大规模的沟谷疏导体系,沟谷规模大(截面积 $0.176\sim0.686\text{ km}^2$ ),指示沟谷单位时间内沉积物可搬运通量大,沟谷的宽深比最大( $14.57\sim22.93$ ),说

明沟谷水系下切作用最小,物源供给能力较弱。

B区源—汇系统沉积物主要经物源搬运通道V2、V3和V4汇入沉积区。V2主物源方位角为 $65^{\circ}$ ,其中包含3个沟谷水系,沟谷宽度( $327\sim568\text{ m}$ )和沟谷规模小( $0.021\sim0.035\text{ km}^2$ ),显示沟谷单位时间内沉积物搬运通量小;但是V2物源通道下的3个沟谷宽深比小,其中最小V2-3沟谷宽深比为5.03,说明该区物源供给能力强,沟谷下切作用显著。V3主物源通道为单一的断槽,主物源方位角为 $122^{\circ}$ ,相对于古沟谷来说,断槽在空间上的发育更为稳定,迁移和摆动作用不明显,断槽在垂向上断距较小(约200 m),宽深比中等(10.17),规模较小(截面积 $0.073\text{ km}^2$ )。V4物源通道主物源方位角为 $152^{\circ}$ ,V4物源又可细分为4个二级沟谷体系,在规模上4个沟谷体系的截面积最小( $0.011\sim0.027\text{ km}^2$ ),指示单位时间沉积物搬运通量最小,但是沟谷下切作用最显著(宽深比最小4.3),物源供给能力强。

C区源—汇系统包含2个主物源通道V5和V6。V5主物源方位角为 $135^{\circ}$ ,进一步可细分为2个沟谷水系,沟谷规模(截面积 $0.085\sim0.519\text{ km}^2$ )和

表1 西湖凹陷平北斜坡带平湖组物源搬运通道参数统计

Table 1 The parametric statistics of sediment transport pathways in the Pinghu Formation, Pingbei slope of the Xihu Sag

源—汇系统	A						B						C			
	主物源通道			V1			V2			V3			V4			V5
主物源方位角(°)	130			65			122			152			135			102
通道编号	V1-1	V1-2	V1-3	V2-1	V2-2	V2-3	V3	V4-1	V4-2	V4-3	V4-4	V5-1	V5-2	V6		
通道宽度(m)	1 603	2 704	3 967	568	495	327	865	435	224	354	283	895	2 427	1 254		
通道深度(m)	110	131	173	62	64	65	85	37	52	77	46	95	214	127		
宽深比	14.57	20.64	22.93	9.16	7.73	5.03	10.17	11.75	4.30	4.59	6.15	9.42	11.34	9.87		
截面积( $\text{km}^2$ )	0.176	0.354	0.686	0.035	0.032	0.021	0.073	0.016	0.011	0.027	0.013	0.085	0.519	0.159		

宽深比(9.42~11.34)中等,单位时间物源搬运通量和物源供给强度中等;V6 主物源方位角为 102°,沟谷截面积为 0.159 km<sup>2</sup>,宽深比为 9.87,物源供给强度和单位时间物源搬运通量较大。

## 2.2 沉积区特征

受地貌和断裂活动的影响,不同地貌条件以及不同时期断裂构造样式控制下的沉积区沉积体展布形态存在较大差异。一方面同一时期不同的地貌条件和断裂活动性限制了不同沉积区可容空间的大小和范围,另一方面不同时期地貌条件与断裂活动性不同,对同一源—汇单元沉积区的控制作用不同。为了区分不同时期各源—汇单元沉积区地貌和断裂活动性差异,以 E<sub>2</sub>PSQ I、E<sub>2</sub>PSQ II 和 E<sub>2</sub>PSQ III 三个三级层序为单元分别进行探讨。同时根据同一时期沉积区不同部位的地貌和断裂发育样式,在平面上将斜坡带、第一坡折带和第二坡折带 3 个次级地貌单元有机结合起来。

**2.2.1 测井与岩心特征** 于兴河等(2017)研究认为,研究区处于半局限海背景,主要发育潮控和河控沉积体系;因此在研究区能发现与之相对应的典型潮控和河控沉积指相标志。潮控沉积体系在钻井岩心上发育有典型的双粘土层、透镜状和脉状层理、羽状交错层理和大型板状交错层理等层理构造;同时由于频繁不稳定水流改造,自然伽马(GR)测井曲线齿化程度高,发育齿化箱型、高幅齿化锯齿形等典型不稳定沉积的测井指相标志(张建培等,2012)。而河控体系在钻井岩心上主要发育单粘土层、板状和槽状交错层理、水平和平行层理、块状层理等沉积指相构造,反映整体以稳定能量水流作用下的沉积产物,在 GR 测井曲线上整体表现为光滑箱型和低幅度锯齿型及其组合形态,即整体表现为低齿化程度特征(李顺利等,2018)。基于此,笔者通过选取研究区第一坡折带内不同源—汇系统下钻井岩心和测井标志进行判别,明确沉积体空间配置关系。结果表明在海陆过渡体系内,不同源—汇系统下沉积区沉积体系存在显著差别(图 6)。

A 区源—汇系统下钻井揭示平湖组 E<sub>2</sub>PSQ II-E<sub>2</sub>PSQ III 地层在 E<sub>2</sub>PSQ II 时期,海平面相对较高,泥岩含量高,垂向上齿化程度高,岩心上主要以灰色泥岩夹透镜状泥质粉砂岩为主(图 6 中 A-3 井 B 与 A 岩心段指示),据潮控指标判定为典型的潮控体系沉积;到了晚期 E<sub>2</sub>PSQ III 时期,相对海平面下降,砂岩含量增高,以大套厚层砂为主,箱型曲线内部齿化程度相对早期(E<sub>2</sub>PSQII 时期)减弱,但仍保持一定

偏移幅度,GR 曲线特征与 E<sub>2</sub>PSQ II 时期相近,仍属以潮汐作用控制为主的沉积。

B 区源—汇系统钻井揭示平湖组 E<sub>2</sub>PSQ I-E<sub>2</sub>PSQ III 整套地层,早期相对海平面低,含砂率较高,砂体齿化程度高,同时岩性资料显示该时期发育大量双粘土层构造,为典型潮汐环境指相标志(图 6 中 B-3 井 H 与 G 岩心段指示);在海平面相对升高的 E<sub>2</sub>PSQ II 时期,泥质含量较发育,整体齿化程度降低,岩性上指示由早期的双粘土层构造转变为晚期的平行层理为主(图 6 中 B-3 井 F 与 E 岩心段指示),潮汐作用减弱逐渐变为以河流作用为主阶段;到了晚期 E<sub>2</sub>PSQ III 时期,砂体含量增高,沉积物向盆推进,砂体在 GR 测井曲线上显示为光滑箱型和低齿化程度锯齿形,岩性上主要以块状、平行层理和斜层理为主的构造(图 6 中 B-3 井 D 与 C 岩心段指示),指示该时期发育典型河控沉积体系的产物。

C 区源—汇系统钻井对平湖组整套地层都有揭示,通过对比,早期 E<sub>2</sub>PSQ I 层序砂体含量高,GR 曲线齿化程度高,岩性上指示其主要发育低角度相交的双粘土层构造,平行层理和块状层理也相对发育(图 6 中 C-2 井 M 与 L 岩心段指示),综合判定为弱潮汐作用控制下的沉积产物;在 E<sub>2</sub>PSQ II 时期,箱型测井曲线和以泥岩为主的锯齿状测井曲线齿化程度显著降低,同时块状砂岩和平行层理以及斜层理构造较为发育(图 6 中 C-2 井 K 与 J 岩心段指示),为稳定水流条件下的沉积产物,因此该时期主要以河流作用为主;晚期 E<sub>2</sub>PSQ III 时期,沉积体向盆地方向推进,低幅度箱型测井曲线更为发育,同时发育白色砂岩夹平行层理和斜层理(图 6 中 C-2 井 I 岩心段指示),为典型河控作用下的三角洲沉积。

**2.2.2 地震相特征** 地震相是沉积区沉积过程和沉积体在地震上的综合响应,能揭示不同源—汇系统下沉积物供给强度大小和水体改造关系,并反映物源搬运强度和水体能量。在河流作用强的地区,物源供给较充分,沉积体堆积速率高,水体改造小,在地震剖面上顺物源方向显示明显的前积体,同时近物源一侧地震同相轴连续性中等—差,垂直物源方向沉积体连片性强。而在潮汐作用较强地区,河流作用相对较弱,沉积体堆积速率低,水体改造程度大,因此顺物源方向发育弱前积反射结构或无典型前积体,地震同相轴连续性好,在垂直物源方向连片性差。基于此,笔者对研究区第一坡折带顺物源方向和第二坡折带垂直物源方向地震相和地震反射结构进行识别,明确研究区各源—汇系统沉积体类型空间

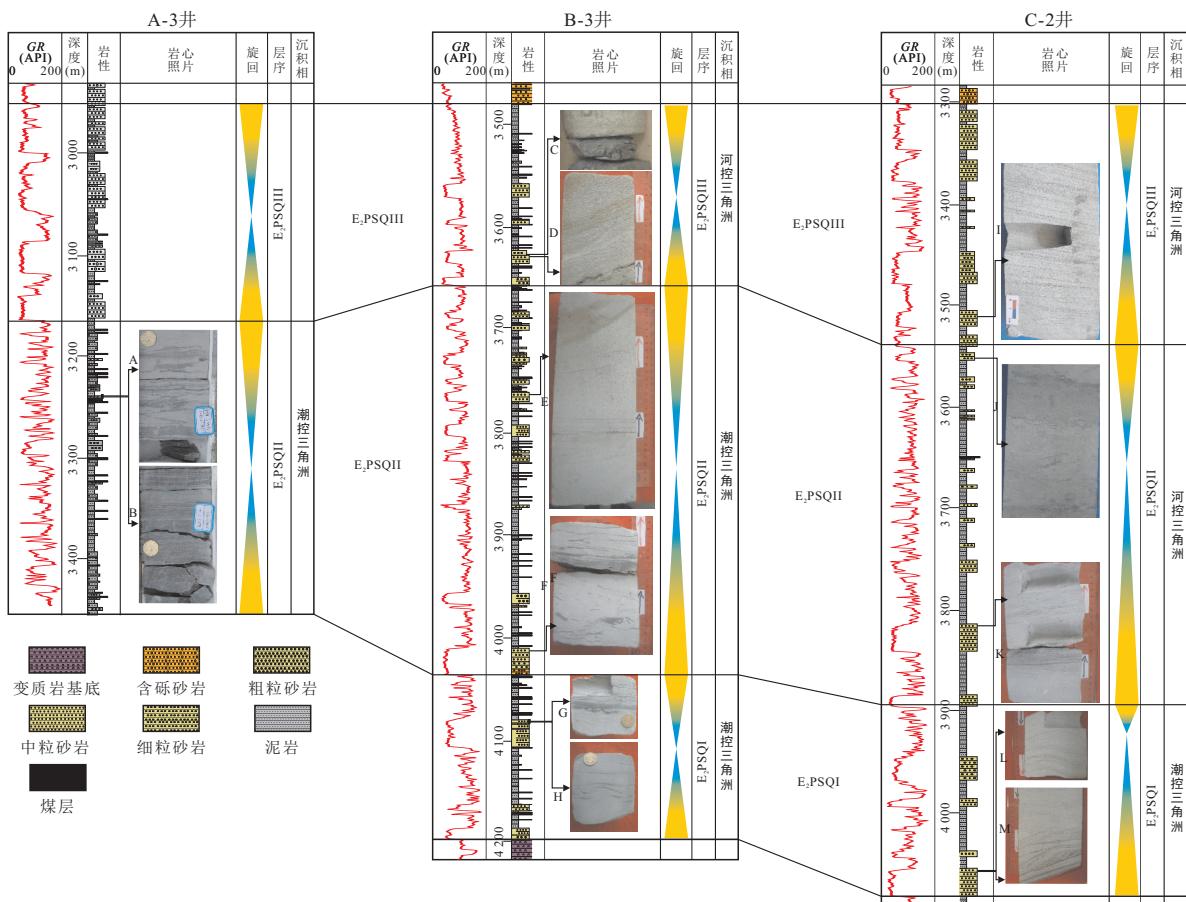


图 6 西湖凹陷平北斜坡带 E<sub>2</sub> PSQI-E<sub>2</sub> PSQIII 层序不同源—汇单元重点井测井相与岩心相分析

Fig.6 Logging and core facies analysis of various S2S systems in the E<sub>2</sub> PSQI-E<sub>2</sub> PSQIII, Pingbei slope of the Xihu Sag  
A.灰色泥质粉砂岩,双粘土层构造;B.黑色层状泥岩夹透镜状泥质粉砂岩;C.上部白色块状细沙岩,下部灰色泥质粉砂岩,冲刷面构造;D.白色块状细粒粉砂岩,平行层理;E.白色块状细粒粉砂岩,平行层理与斜层理交错;F.灰白色泥质粉砂岩夹双粘土层,脉状层理;G.灰白色泥质粉砂岩夹双粘土层构造,泥砾;H.灰白色泥质粉砂岩夹双粘土层条带;I.白色层状中砂岩,上部斜层理,下部平行层理;J.灰白色块状泥质粉砂岩,扰动构造;K.灰白色中砂岩夹单泥质条带;L.白色砂岩夹单泥质条带;M.白色砂岩夹泥岩薄层

分布规律。

第一坡折带内 A 区源—汇系统顺物源方向 E<sub>2</sub> PSQ I 时期主要发育弱振幅杂乱反射地震相,同时发育中—强振幅席状地震相;E<sub>2</sub> PSQ II-E<sub>2</sub> PSQ III 时期主要发育连续弱前积反射结构、中—弱振幅较连续孤立地震相(图 7a),指示在平湖组时期较低物源供给条件下强潮汐作用改造的结果。

B 区源—汇系统下第一坡折带内沉积区地貌受 NEE 向低隆起影响,在低隆起控制的区域之间发育 NEE 向凹槽。E<sub>2</sub> PSQ I-E<sub>2</sub> PSQ II-E<sub>2</sub> PSQ III 地震反射同相轴显示波状前积反射对应的沉积体范围呈先后退(E<sub>2</sub> PSQ II)后推进(E<sub>2</sub> PSQ III)趋势。E<sub>2</sub> PSQ I 层序发育多期弱前积型弱振幅短轴蠕虫状反射,指示物源供给强度相对较低,水体能量较强,为以潮汐作用为主的沉积。在 E<sub>2</sub> PSQ II-E<sub>2</sub> PSQ III 时期前积体前积角度增大,地震同相轴以高角度连续—较连续

样式展布,指示河流作用逐渐增大,潮汐作用逐渐减小。整体上在 B 区源—汇系统第一坡折带内河流供给相对 A 区增大,但早期 E<sub>2</sub> PSQ I-E<sub>2</sub> PSQ II 还是以潮汐作用为主,晚期 E<sub>2</sub> PSQ III 河流供给作用增强,转变为以河流作用为主(图 7b)。

C 区源—汇系统第一坡折带内沉积区为多级正向断裂控制下的断坡地貌。E<sub>2</sub> PSQ I 时期发育中振幅—较连续地震反射,楔状反射结构,指示弱潮汐作用在该时期对沉积体仍然有影响。E<sub>2</sub> PSQ II-E<sub>2</sub> PSQ III 时期楔形前积反射规模增大,对应于沉积环境能量增强,沉积体向盆地一次推进距离增大,整体上地震同相轴呈楔状连续反射结构,延伸距离远,为典型河流作用控制下的沉积(图 7c)。

笔者对 A、B 和 C 区 3 个源—汇系统第二坡折带内地震相进行横向对比。A 区孤立型沉积体呈底平顶凸的地震反射样式,早期(E<sub>2</sub> PSQ I-E<sub>2</sub> PSQ II)

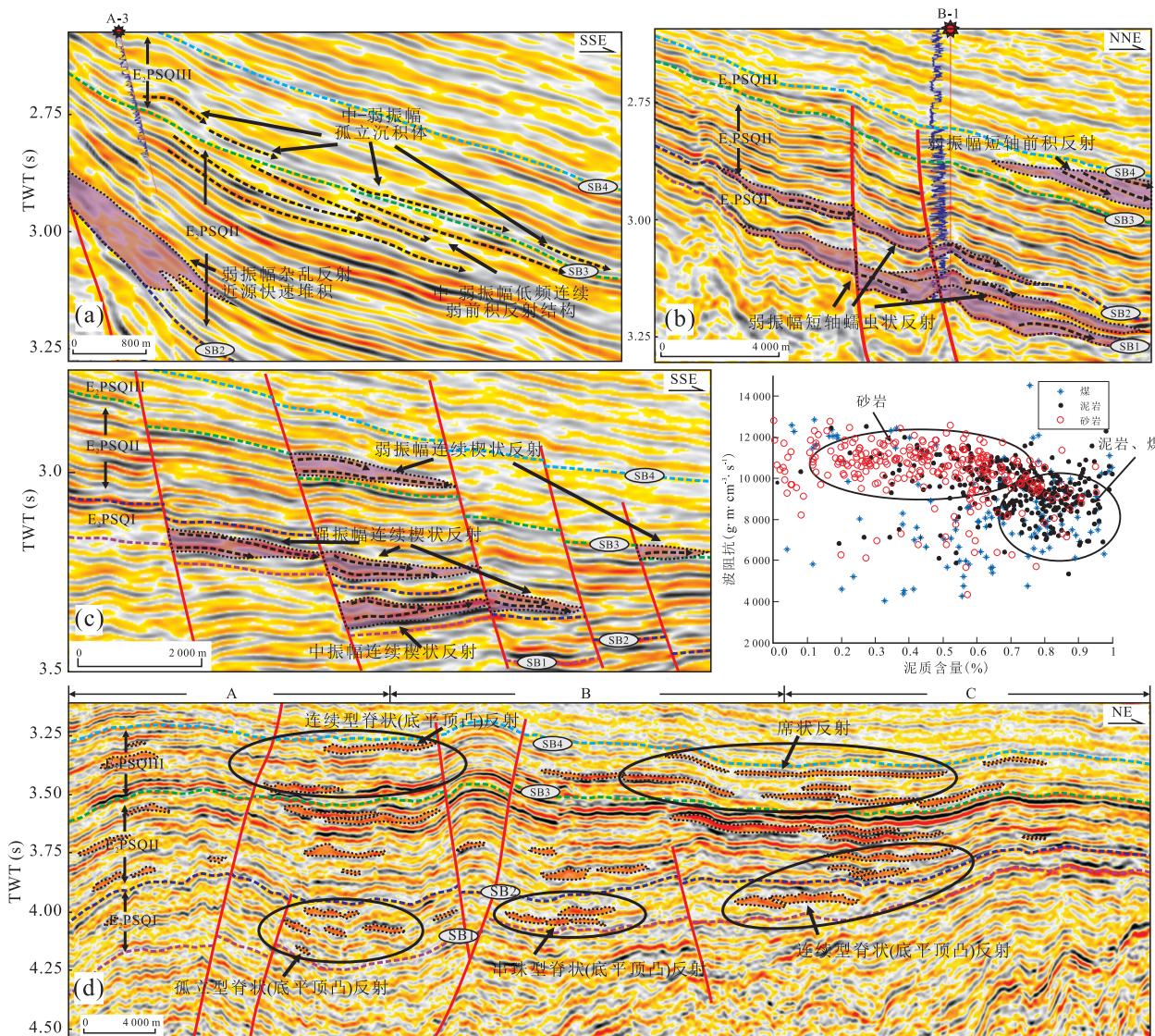


图 7 西湖凹陷平北斜坡带  $E_2$  PSQI- $E_2$  PSQIII 层序不同源—汇单元典型地震相分析

Fig.7 Seismic reflection and seismic facies characteristics of various S2S systems in the  $E_2$  PSQI- $E_2$  PSQIII, Pingbei Slope of the Xihu Sag  
剖面位置见图 3

底平顶凸型同相轴呈孤立型分布,晚期( $E_2$  PSQ III)连续性增强,但仍然为连续型底平顶凸地震反射样式;指示 A 区平湖组时期整体受潮汐作用影响。B 区孤立型沉积体早期( $E_2$  PSQ I)以串珠型底平顶凸地震反射样式为主,中期( $E_2$  PSQ II)孤立型沉积体发育连续型底平顶凸地震反射,晚期( $E_2$  PSQ III)发育席状地震反射;指示  $E_2$  PSQ I- $E_2$  PSQ II 时期以潮汐作用为主,在  $E_2$  PSQ III 时期以河流作用为主。C 区孤立型沉积体早期( $E_2$  PSQ I- $E_2$  PSQ II)发育连续型底平顶凸地震反射结构,晚期( $E_2$  PSQ III)发育席状地震反射结构(图 7d);指示  $E_2$  PSQ I 时期以潮汐作用为主,  $E_2$  PSQ II- $E_2$  PSQ III 时期以河流作用为主。

笔者通过对第一坡折带和第二坡折带沉积体横向和纵向对比发现,A 区水体潮汐作用最强,到 C 区逐渐减弱。垂向上,早期( $E_2$  PSQ I)潮汐作用强,对 A、B 和 C 区 3 个源—汇系统都有改造;晚期( $E_2$  PSQ III)潮汐作用减小,只对第二坡折带 A 区源—汇系统有影响,B 区源—汇系统潮汐作用对沉积体改造作用不显著,C 区源—汇系统在晚期无明显潮汐作用迹象,河流作用控制沉积。

### 2.2.3 地震属性分析

地震属性分析是对地震波的几何学、运动学、动力学和统计学特征进行分析,进而得出沉积体在平面上的展布范围,地震属性分析主要侧重于振幅类属性分析、频率类属性分析和波形类属性分析,振幅类属性主要反映层内波阻抗、

表2 西湖凹陷平北斜坡带E<sub>2</sub>PSQI-E<sub>2</sub>PSQIII层序钻井岩性特征及多属性吻合率统计

Table 2 Analysis of drilling lithology characteristics and multi-attribute coincidence rate in the E<sub>2</sub>PSQI-E<sub>2</sub>PSQIII, Pingbei slope of the Xihu Sag

层序	源汇系统	井名	岩性组合特征	含砂率	多属性	吻合率
E <sub>2</sub> PSQIII	A	A-1		55.8%	黄	
		A-2	厚层砂岩夹泥岩	49.4%	黄	
		A-3		54.8%	黄	
	B	B-1	泥岩夹中-厚层砂岩	39.7%	黄	
		B-2	泥岩夹厚层砂岩	35.5%	黄	
		B-3		32.9%	黄	
		B-4	厚层砂岩与厚层泥岩互层	49.1%	黄-蓝	85.7%
	C	B-5	泥岩夹厚层砂岩	55.7%	黄-蓝	
		C-1	厚层砂岩与厚层泥岩互层	45.5%	黄	
		C-2	厚层砂岩夹泥岩	66.3%	黄	
		C-3	上厚层砂岩, 下泥岩	66.9%	黄	
		C-4		51.3%	黄-蓝	
E <sub>2</sub> PSQII	A	C-5	上厚层砂岩, 下砂泥互层	62.6%	黄	
		A-1		13.6%	黄-蓝	
		A-2	厚层泥岩夹中-厚砂岩	20.7%	黄-蓝	
	B	A-3		25.0%	黄-蓝	
		B-1		25.7%	黄	
		B-2	厚层泥岩夹中-厚砂岩	25.2%	黄-蓝	
		B-3		34.7%	黄-蓝	
		B-4	厚层泥岩夹砂岩	24.4%	黄	85.7%
	C	B-5	砂泥互层	34.3%	黄	
		C-1	厚层泥岩夹厚层砂岩	22.3%	黄-蓝	
		C-2	砂泥互层	30.8%	黄	
		C-3		49.3%	黄	
		C-4	厚层泥岩夹厚层砂岩	34.1%	黄	
E <sub>2</sub> PSQI	B	C-5	砂泥互层	43.4%	黄-蓝	
		B-1	下厚层砂砾, 上厚层泥	35.8%	红	
		B-2		24.8%	红-黄	
		B-3	厚层泥岩夹砂岩	28.2%	红-黄	
		B-4	下厚层砂岩, 上厚层泥	49.6%	黄	
	C	B-5	厚层泥岩夹砂岩	20.2%	蓝	95.3%
		C-1	下厚层砂岩, 上厚层泥	19.4%	红-黄	
		C-2		26.2%	红-黄	
		C-3	泥岩夹厚层砂岩	25.7%	黄	

地层厚度、特殊岩体和岩性变化等;频率类属性主要反映地层厚度变化,岩性及流体成分的变化(魏小松等,2017;曾洪流等,2018);波形类属性侧重于层内波阻抗变化规律,沉积层序和连续性。通常单一的属性只能粗略指导沉积体及其边界的识别,精度和可靠性程度较低,通过对振幅、频率和波形类属性综合分析,进行多属性融合,对沉积体尤其是对其边界的识别精确性更高。因此,在地震属性分析过程中,针对平北地区煤层干扰较为突出的问题,笔者选取均方根振幅、能量半衰时、瞬时相位和频带宽度4种属性进行多属性融合分析(图8),共同求取沉积体分布范围和沉积边界。同时,根据钻井含砂率和多属性异常进行验证,红色代表富砂沉积,黄色代表富砂程

度次之,蓝色代表富泥沉积,由红色、黄色和蓝色相过渡代表了盆地边缘向盆地中心的过渡,也指示了沉积水体能量由强到弱的转变。钻井岩性指示和地震属性对比研究表明,研究区由早期到晚期钻井与多属性吻合率分别为95.3%、85.7%和85.7%,表明地震多属性异常能够反映平面沉积相带和砂体的变化(表2)。

E<sub>2</sub>PSQ I沉积时期对应于断坳转换期的初始阶段,断裂活动性较大,沉积旋回上上升半旋回为主。该阶段各沉积单元以及单元内部不同沉积部位厚度较大(图8a<sub>1</sub>)。多属性异常显示强振幅属性沉积体主要分布于斜坡带和第一坡折带断裂根部以及低隆起限定的沉积区内(图8b<sub>1</sub>),钻井标示B区和C

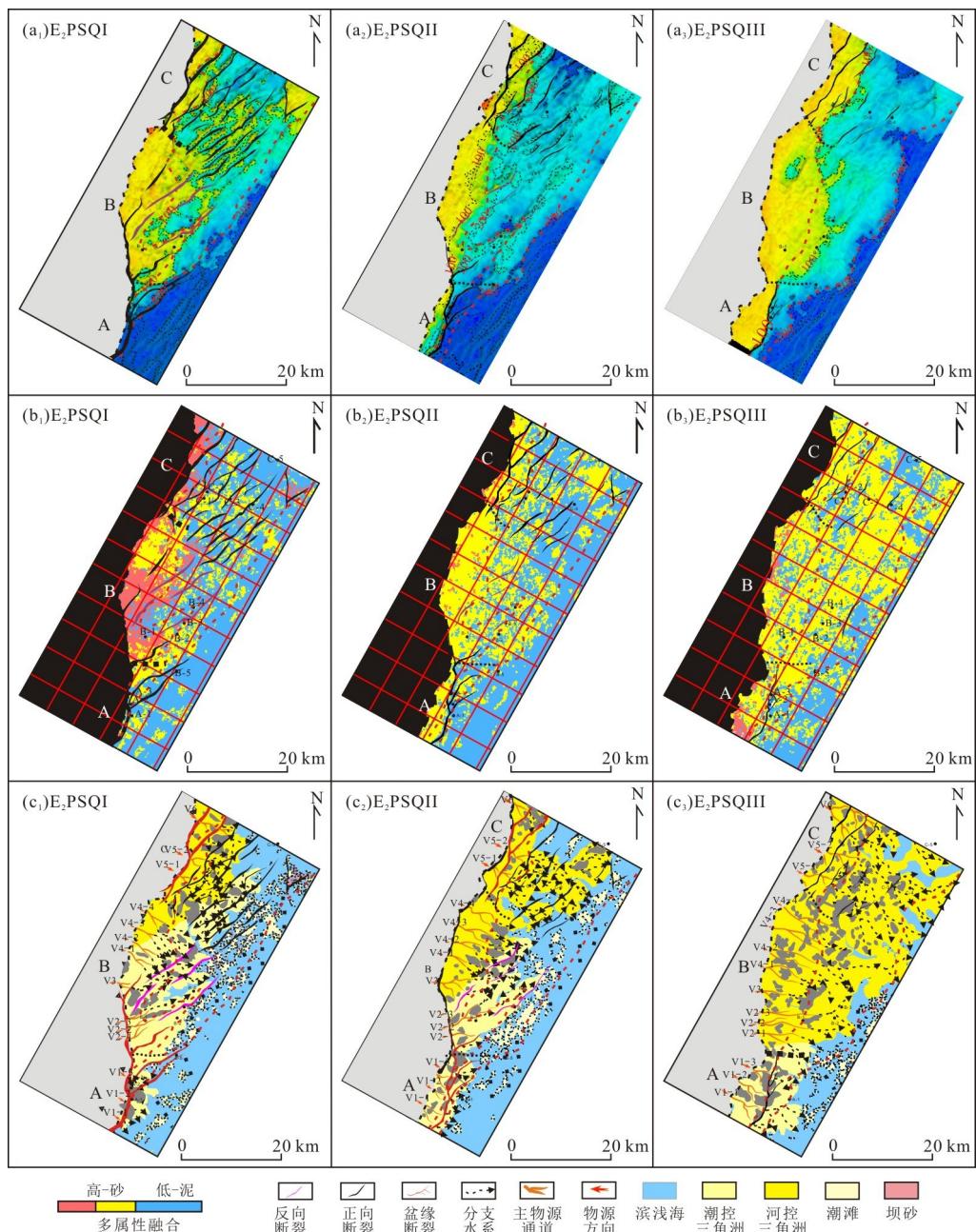


图 8 西湖凹陷平北斜坡带 E<sub>2</sub> PSQI-E<sub>2</sub> PSQIII 层序不同源—汇单元古地貌(a<sub>1</sub>~a<sub>3</sub>)、多属性分析(b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>)及沉积相平面分布(c<sub>1</sub>~c<sub>3</sub>)

Fig.8 Paleogeomorphology(a<sub>1</sub>~a<sub>3</sub>), multi-attribute analysis (b<sub>1</sub>~b<sub>3</sub>) and sedimentary facies plane distribution (c<sub>1</sub>~c<sub>3</sub>) of various S2S systems in the E<sub>2</sub> PSQI-E<sub>2</sub> PSQIII, Pingbei slope of the Xihu Sag

区岩性组合主要以厚层砂和厚层泥为主, 对应于研究区富砂(红色)和过渡(黄色)多属性区域, 钻井吻合率为 95.3% (表 2). 结合多属性异常与钻井标示, A 区第二坡折带主要发育 3 个孤立短轴条状沉积体, 单个沉积体面积为 4~6 km<sup>2</sup>, 与沟谷入口(V1-1、V1-2、V1-3)相对应, 沉积体整体呈指状推进; B 区沉积体主要分布在斜坡带和第一坡折带, 沉积体延伸方向与物源方向一致(NEE), 受低隆起影响沉

积体主要位于低隆起和低隆起控制的凹槽内, 呈 NEE 向分布, 过低隆起沉积范围较小, 面积约为 195 km<sup>2</sup>; C 区沉积体主要分布于斜坡带和第一坡折带, 正向多级断阶对沉积体控制作用较强, 在平面上沉积体呈现多级沉积体向前推进的样式, 分布面积约为 240 km<sup>2</sup> (图 8c<sub>1</sub>). 全区第二坡折带沉积体呈 SE 向展布, 潮汐作用改造明显.

E<sub>2</sub> PSQ II 继承于 E<sub>2</sub> PSQ I 地貌和断裂发育样

式,相对 E<sub>2</sub>PSQ I 时期来说断裂活动性进一步减弱(图 8a<sub>2</sub>),海平面处于快速上升阶段,沉积旋回以对称半旋回为主。多属性异常显示红色代表的强振幅属性异常在研究区发育规模小,只存在于部分斜坡带内,主要以黄色属性异常代表的中等振幅属性为主,地貌和断裂对其分隔效果降低,连片性增强(图 8b<sub>2</sub>)。钻井和地震属性标示显示,该时期沉积体规模较 E<sub>2</sub>PSQ I 时期增大,岩性组合以砂泥互层为主,吻合率为 85.7% (表 2),整体上多属性分析能与岩性组合相匹配。通过多属性与钻井岩性组合标定,A 区沉积体在第一坡折带呈短轴条带状分布,斜坡带与第二坡折带沉积体面积约为 45 km<sup>2</sup>;B 区古隆起对沉积体的限定作用减弱,沉积体在第一坡折带分布范围扩大,同时沉积体延伸方向向斜坡倾向(SE)迁移,面积约为 217 km<sup>2</sup>;C 区断裂活动性降低,但是正断层对沉积区的调节作用仍然较为显著,沉积体分布范围增大,约为 268 km<sup>2</sup>(图 8c<sub>2</sub>)。全区第二坡折带孤立沉积体规模和数量减少,整体呈 SE 向展布,为相对海平面升高沉积物供给减少情况下潮汐改造的产物,指示在断裂和地貌控制作用减弱的背景下,沉积体逐渐扩散为片状沉积的过程。

E<sub>2</sub>PSQ III 沉积时期处于断坳转换的晚期,与 E<sub>2</sub>PSQ I 和 E<sub>2</sub>PSQ II 时期地貌格局和断裂组合存在显著差别。A 区盆缘断裂转化为盆内断裂;B 区低隆和断裂不活动,不再控制沉积;C 区断裂活动性减弱,但断裂仍然对沉积起控制作用(图 8a<sub>3</sub>),海平面处于快速下降期。在这样的背景下,强振幅属性异常主要分布在部分 A 区和 B 区斜坡带内,中振幅属性分布范围显著增大,相对早期 E<sub>2</sub>PSQ I 和 E<sub>2</sub>PSQ II 来说沉积体推进范围增大,连片性好。钻井标示该时期为砂岩含量最高的时期,主要发育厚层砂岩和泥岩,各井含砂率增高;由于砂体含量增高,大套泥岩和大套砂岩的岩性组合发育少,主要以多期大套砂岩夹泥岩为主,一定程度上压制了阻抗差的大小,因此在多属性上主要以黄色为主,整体吻合率为 85.7% (表 2),即多属性能较好指示并预测区内岩性组合的平面分布。其中,A 区沉积体分布于斜坡带、第一坡折带和第二坡折带,呈长轴片状分布,分布面積约为 142 km<sup>2</sup>;B 区沉积体不受低隆起和断裂控制,沉积体主要分布于斜坡带和第一坡折带,第二坡折带分布范围小,整体面積约为 270 km<sup>2</sup>;C 区沉积体受正断层控制作用减弱,沉积体向前推进距离增大,主要分布于斜坡带、第一坡折带和第二坡折带,分布范围约为 348 km<sup>2</sup>(图 8c<sub>3</sub>)。全区只有 A 区和 B

区源—汇系统的第二坡折带沉积体呈 SE 向条带状展布,沉积体连片性增强,潮汐作用减小。

平湖组地震多属性分析及其垂向演化表明,沉积区沉积体分布受物源、地貌和断裂演化以及水体作用共同控制。在海平面下降阶段(E<sub>2</sub>PSQ I),隆起地貌和较高的断裂活动性限制了沉积体的平面展布;SE 向条带状沉积体规模大,数量高。随着海平面上升(E<sub>2</sub>PSQ II),沉积体范围整体呈缩小的趋势,而地貌趋于平缓和断裂活动性降低的地区,沉积体受地貌和断裂控制作用降低,沉积体范围反而有相对增大趋势;此时 SE 向条带状沉积体也大量发育,数量较 E<sub>2</sub>PSQ I 时期减小。在海平面再次降低(E<sub>2</sub>PSQ III)阶段,断裂活动性进一步减小,隆起地貌消失直至以斜坡地貌为主,沉积体推进距离增大,沉积体由早期的短轴状和条带状分布逐渐演化为长轴状和片状分布。位于第二坡折带的 SE 向条带状沉积体规模和数量明显减少,以连片朵状沉积体为主。

### 3 源—汇系统单元差异性耦合

源—汇系统是物源剥蚀、搬运—沉积物堆积、改造动态耦合的过程,母岩类型、供源强度和搬运通道条件、沉积区空间配置、水体改造等因素都会对这一系统产生影响;同时,不同的因素对源—汇系统的控制作用不同,对源—汇系统各单元的控制强度也有显著差异。因此需要针对不同控制因素,在各源—汇系统内部进行差异性分析,对比不同源—汇系统主控因素差异,明确不同源—汇系统下沉积单元沉积体的堆积机制。

#### 3.1 物源组成与供给强度差异

物源区母岩的类型直接决定了沉积区物质组成,同时不同物源母岩类型也控制了基岩风化和剥蚀能力,一定程度上决定了汇水区发育的沉积体规模和沉积物总量。A 区源—汇系统主要基岩组成为南部变质岩和中部火成岩,B 区物源基底组成主要为中部火成岩,C 区物源基底组成主要为北部变质岩(图 3~4),3 个源—汇系统物源存在明显差异。对沟谷宽深比和沉积体推进方向的分析表明,A 区源—汇系统沟谷宽深比最大,物源搬运强度最小,同时沉积体延展范围最小,物源供给最弱;而 B 区源—汇系统沟谷宽深比小,沉积体延展范围中等,物源供给强度中等;C 区源—汇系统宽深比小,沉积体延展范围最大,物源供给最强(表 3)。

此外,气候和海平面变化对沉积物风化和剥蚀

表 3 西湖凹陷平北斜坡带 E<sub>2</sub>PSQ I—E<sub>2</sub>PSQ III 层序不同源—汇系统重点参数统计Table 3 Parameter statistics of various S2S systems in the E<sub>2</sub>PSQ I—E<sub>2</sub>PSQ III, Pingbei Slope of the Xihu Sag

源—汇		源							汇		
系统	母岩类型	物源通道编号	物源通道方向	水系编号	水系类型	宽深比	截面积	构造样式	地貌形态	延伸距离	沉积体面积
A	变质岩、花岗岩	V1	130	V1-1		14.57	0.180	E <sub>2</sub> PSQ III	缓坡断裂	斜坡地貌	16.0
				V1-2	沟谷	20.64	0.354	E <sub>2</sub> PSQ II	断裂陡坡	平缓地貌	9.5
				V1-3		22.93	0.686	E <sub>2</sub> PSQ I	断裂陡坡	平缓地貌	4.0
	花岗岩	V2	65	V2-1		9.16	0.035	E <sub>2</sub> PSQ III		斜坡地貌	29.5
				V2-2	沟谷	7.73	0.032				270
				V2-3		5.03	0.021				
B	花岗岩	V3	122	V3	断槽	10.17	0.073	E <sub>2</sub> PSQ II	反向断阶	古隆起	26.6
				V4-1		11.75	0.016				217
		V4	152	V4-2		4.30	0.011				
				V4-3	沟谷	4.59	0.027	E <sub>2</sub> PSQ I	反向断阶	古隆起	28.9
				V4-4		6.15	0.013				195
				V5-1		9.42	0.085	E <sub>2</sub> PSQ III	正向多级断阶	斜坡地貌	31.2
C	变质岩	V5	135	V5-2	沟谷	11.34	0.519	E <sub>2</sub> PSQ II	正向多级断阶	斜坡地貌	27.8
				V6		9.87	0.159	E <sub>2</sub> PSQ I	正向多级断阶	斜坡地貌	21.4

注: 截面积和沉积体面积单位为 km<sup>2</sup>; 延伸距离单位为 km.

的控制作用也十分显著, 在 4 个源—汇系统沉积充填垂向演化上有较好体现。E<sub>2</sub>PSQ I 沉积时期气候较干燥, 海平面低, 各源—汇单元内部沉积物都有一定规模的堆积; 而 E<sub>2</sub>PSQ II 沉积时期气候湿润, 海平面升高, 物源供给减小, 各沉积体萎缩, 泥质含量升高; E<sub>2</sub>PSQ III 沉积时期气候由湿润转向干旱, 海平面降低, 物源供给显著增强, 沉积物显著向前推进, 沉积体范围增大。垂向演化指示沉积规模呈现 E<sub>2</sub>PSQ I 扩张—E<sub>2</sub>PSQ II 萎缩—E<sub>2</sub>PSQ III 扩张的幕式变化特征(图 8c<sub>1</sub>~8c<sub>3</sub>)。

### 3.2 地貌格局与断裂演化

研究区地貌格局和断裂演化对各个源—汇系统下沉积区沉积体大小和优势堆积方向控制作用十分显著, 对沉积区内优势沉积体的发育和沉积体在空间上的分布具有重要影响。

A 区源—汇系统早期(E<sub>2</sub>PSQ I—E<sub>2</sub>PSQ II)发育断裂陡坡地貌格局, 盆缘断裂限定了沉积边界, 晚期(E<sub>2</sub>PSQ III)转变为缓坡断裂地貌格局, 盆缘断裂转变为盆内调节断裂。在该背景之下, 早期 E<sub>2</sub>PSQ I 在 3 个区物源供给最弱的条件下依然发育有近源快速堆积沉积(物源供给速率大)的特征, 表明盆缘断裂控制了沉积体边界的同时对沉积体堆积部位具有调节作用; 晚期 E<sub>2</sub>PSQ III 盆缘断裂转变为盆内断裂, 平缓地貌转变为斜坡地貌(图 8a<sub>1</sub>~8a<sub>3</sub> 中 A 区), 在该背景之下断裂对沉积体的控制作用减弱,

沉积体推进距离和展布范围增大, 地貌对沉积体控制作用更为显著。

B 区源—汇系统早期(E<sub>2</sub>PSQ I—E<sub>2</sub>PSQ II)发育低隆和反向断阶控制的 NEE 向条状凹槽地貌格局, 晚期低隆起和反向断阶都不发育, 呈平缓斜坡地貌。在这样的背景之下, 早期低隆和反向断阶对沉积体的展布形态控制作用更为显著, 早期沉积体呈 NEE 向条带状和顺斜坡 SE 向朵状展布, 表现出地貌和断裂对沉积体的阻挡和限定作用; 晚期限定作用消除(图 8a<sub>1</sub>~8a<sub>3</sub> 中 B 区), 在斜坡地貌背景下沉积体展布范围增大, 转变为片状沉积。

C 区源—汇系统为斜坡背景下发育的多级同向断阶地貌, 在整个平湖组时期都有发育, 在该背景之下沉积体呈多级朵状向前推进。不同之处在于早期同向断阶发育数量多, 规模大, 朵状沉积体数量多, 单个沉积体展布范围相对较小; 晚期同向断阶数量减少(图 8a<sub>1</sub>~8a<sub>3</sub> 中 C 区), 朵状沉积体数量减小, 但单个沉积体展布范围增大, 由多个连续朵状向多个连续片状沉积体转变(表 3)。

### 3.3 潮汐作用对沉积体的改造差异

潮汐作用对各源—汇系统沉积体的改造主要体现在沉积体的规模、平面形态、空间连续性及其内部优势岩性组合上。

潮汐作用对沉积体规模的影响主要体现在对堆积沉积体的改造。其中, 研究区内 A 区源—汇系统

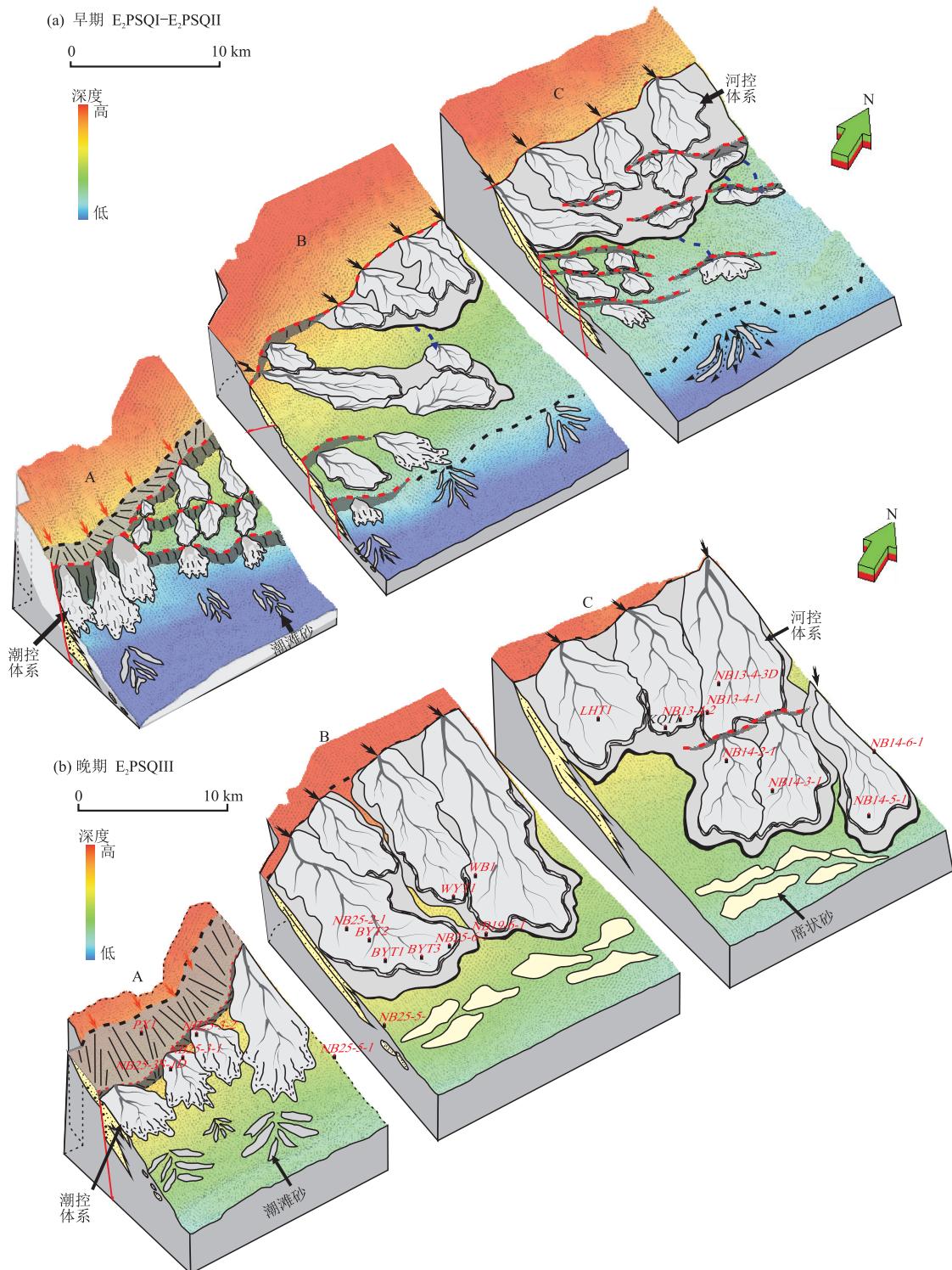


图 9 西湖凹陷平北斜坡带平湖组早晚期不同海陆过渡相源—汇系统差异性及其耦合模式

Fig.9 Differential coupling model of S2S systems with transitional facies in the E<sub>2</sub> PSQI-E<sub>2</sub> PSQIII, Pingbei slope of the Xihu Sag

最为显著。A区源—汇系统物源供给强度低,同时受陡坡型控边断裂的影响,沉积体主要堆积于陡坡断裂根部,主体沉积范围小,沉积体推进距离短,主要发育于第一坡折带内。强潮汐作用下,在沉积区向盆一侧

第二坡折带仍然发育有大量孤立型沉积体,期次多且垂向上呈一定规模,因此其在一定程度上增加了沉积体展布规模。B和C区源—汇系统,潮汐作用虽弱于A区源—汇系统,但早期潮汐作用对沉积体规模的改

造作用也同样明显。

潮汐作用对沉积体形态的改造同样十分明显。研究区处于半局限海背景,局限海开口近似于由北向南方向(任建业等,1998;于兴河等,2017)。早期潮汐作用强,A、B 和 C 区源—汇系统都受潮汐作用控制,在第二坡折带(潮汐作用主要影响区域)沉积体主要呈 SE 向和 N 向条带状展布,席状和朵叶状沉积体不发育;到了晚期 A 区源—汇系统仍然受潮汐作用影响,主要发育 SE 向条带状沉积体,B 和 C 区受潮汐作用减弱,条带状沉积体不发育,转而以席状或朵叶状沉积体为主。

潮汐作用能改变沉积体空间上的连续性。早期潮汐作用强,潮汐改造产生的 A、B 和 C 区源—汇系统沉积区潮汐砂脊在空间上零散分布,虽然在空间上具有一定的规模和形态,但各潮汐砂脊之间连通性差,呈孤立形态展布。晚期 A 和 B 区源—汇系统潮汐作用减弱,孤立型潮汐脊状砂数量减少,但连片复合型潮汐脊状砂数量增多,且砂体横向连片性增强,呈多个潮汐砂脊串珠状排列;到 C 区源—汇系统潮汐作用不显著,潮汐砂不发育,在河控三角洲内部发育的席状砂连续性进一步加强。总体来说,潮汐作用对沉积体空间连续性具有破坏作用。

潮汐作用对沉积体内部砂体在空间上的配置改造尤为显著。受潮汐作用影响,沉积体内部砂体主要与泥岩为互生关系,同时伴随着潮汐作用的改造,潮汐砂脊发育。A 区源—汇系统除发育顺断裂的 SN 向带状砂以外,还多发育 SE 向条带状潮汐改造富砂带,B 和 C 区源—汇系统第二坡折带潮汐作用将早期以席状(朵叶状)为主的片状砂体改造为不连续的 SE 向条带状富砂带;晚期潮汐作用减弱,A 区源—汇系统受潮汐作用控制,仍然发育 SN 向和 SE 向两类条带状砂体,B 和 C 区源—汇系统受潮汐影响小,条带状潮汐富砂带不发育。

### 3.4 源—汇耦合模式差异

物源区母岩类型、供给强度和沉积区空间配置以及潮汐改造等差异,共同控制了不同模式的源—汇系统的发育。基于源—汇配置关系差异,不同源—汇系统耦合模式存在明显的差异(图 9)。

源—汇系统各单元参数研究表明,A 区处于低物源供给强度下,SE 向(V1)沟谷通道疏导下的单级断裂和典型潮汐环境控制下的小规模指状沉积体。早期( $E_2$ PSQI— $E_2$ PSQII)盆缘断裂控制沉积边界的同时也调节沉积体的堆积方式,潮汐作用强,为潮控体系下的小规模条带状堆积(图 9a);晚期( $E_2$ PSQIII)盆缘

断裂演化成盆内断裂,不控制沉积边界,沉积体范围增大,但由于物源供给强度相对较低、沉积规模小,同时潮汐作用减弱,仍发育潮控沉积体系,沉积体平面上由条带状向朵叶状转变(图 9b)。A 区整体为低物源供给—单断—潮汐改造型源—汇系统耦合模式。

B 区处于中等强度物源供给之下,早期发育 NEE 向沟谷通道(V2)、SE 向断槽(V3)和沟谷(V4)疏导下的中型潮控—河控沉积体。早期( $E_2$ PSQI— $E_2$ PSQII)低隆起和反向断阶限定和阻挡了沉积体空间展布,同时潮汐作用对沉积体具有改造作用,整体上在沉积区发育 NEE 向条带状和 SE 向朵状潮控沉积体(图 9a);晚期( $E_2$ PSQIII)低隆和反向断阶不控制沉积,转变为缓坡地貌,潮汐作用不显著,沉积体整体呈 SE 向片状展布(图 9b)。B 区整体为中等物源供给—古隆起和反向断阶—河控—潮控型源—汇系统耦合模式。

C 区处于强物源供给之下,SE 向(V5、V6)沟谷通道疏导下的同向断阶控制下的多组大型朵状沉积体。早期( $E_2$ PSQI— $E_2$ PSQII)潮汐作用对沉积体有改造作用,但整体潮汐作用不强,主要发育 SE 向多级朵状沉积体(图 9a);晚期( $E_2$ PSQIII)以河流作用为主,同时同向断阶数量减少,主要发育 SE 向多级片状沉积体(图 9b)。C 区整体为强物源供给—同向断阶—河控—潮控型源—汇系统耦合模式。

综合不同源—汇耦合模式下母岩类型、物源供给、沉积区空间配置以及潮汐改造等条件可知,C 区源—汇系统物源供给最强,沉积区沉积体展布范围最广,潮汐改造作用最小,第一坡折带内沉积体发育规模最大;尽管 A 区沉积物源供给最小,但是潮汐改造作用最强,在第二坡折带条带状沉积体在  $E_2$ PSQI— $E_2$ PSQIII 三个层序都有发育,是潮汐改造砂体最好的发育区。

## 4 结论

(1) 根据平北地区地质条件的差异,将研究区源—汇系统划分为 A 区断裂陡坡源—汇系统、B 区缓坡低隆对向型源—汇系统和 C 区缓坡正向多级断阶型源—汇系统;同时基于地貌特征和断裂样式差异,每个源—汇系统内部又被划分为搬运带、斜坡带、第一坡折带和第二坡折带 4 个单元。

(2) 明确了源—汇系统单元差异性,A 区源—汇系统物源供给强度低,沉积沟谷发育规模最大,下切程度低(宽深比大),沉积区沉积体呈短轴状分布,沉积规模小;B 区源—汇系统物源供给充足,沟谷规模

小,下切程度大(宽深比小),沉积区沉积体呈长轴状分布,沉积规模中等;C区源—汇系统物源供给充足,沟谷体系发育规模中等,宽深比中等,沉积体呈多级推进,沉积规模最大。

(3)通过岩心、测井、地震相和地震多属性分析,明确了平湖组3个源—汇系统潮汐作用规律,早期( $E_2$ PSQI)潮汐作用强,A、B和C区3个源—汇系统都受到潮汐作用的影响和控制,第二坡折带内3个源—汇系统沉积体都受到一定程度改造;晚期( $E_2$ PSQIII)潮汐作用减弱,只有A区源—汇系统主要受潮汐作用影响,B和C区源—汇系统潮汐作用不明显,因此第二坡折带内只有A区源—汇系统发育受潮汐改造的条带状沉积体,B和C区源—汇系统潮汐改造作用不显著。

(4)基于不同源—汇系统的控制因素存在显著差异,建立了A区为低物源供给—单断—潮汐改造型源—汇耦合模式,B区为中等物源供给—古隆起与反向断阶—河控—潮控型源—汇耦合模式,C区为高物源供给—同向断阶—河控—潮控型源—汇耦合模式。

## References

- Allen, P., 2005. Striking a Chord. *Nature*, 434 (7036): 961. <https://doi.org/10.1038/434961a>
- Allen, P.A., 2008. From Landscapes into Geological History. *Nature*, 451 (7176): 274—276. <https://doi.org/10.1038/nature06586>
- Allen, P.A., Hovius, N., 1998. Sediment Supply from Landslide-Dominated Catchments: Implications for Basin-Margin Fans. *Basin Research*, 10 (1): 19—35. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1998.00060.x>
- Cai, H., Zhang, J.P., 2013. Characteristics of Faults on the Pinghu Slope of Xihu Sag, the East China Sea Shelf Basin and Their Sealing Capacity. *Marine Geology Frontiers*, 29 (4): 20—26 (in Chinese with English abstract).
- Cai, H., Zhang, J.P., Tang, X.J., 2014. Characteristics of the Fault Systems and Their Control on Hydrocarbon Accumulation in the Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Nature Gas Industry*, 34 (10): 18—26 (in Chinese with English abstract).
- Duan, D.P., Cai, H., Ruan, J.X., et al., 2015. Study about the Sedimentary Microfacies of PH Fm. in X Oilfield—Taking FHT Area as an Example. *Offshore Oil*, 35 (1): 42—46 (in Chinese with English abstract).
- Gao, W.Z., Tian, C., Zhao, H., et al., 2015. Discussion on the Hydrocarbon Exploration Potential of Non-Structural Reservoir of the Pinghu Slope in Xihu Sag. *Offshore Oil*, 35 (1): 22—26 (in Chinese with English abstract).
- Hu, W.S., Cai, F., Hu, F., et al., 2010. The Characteristics of Tectonic Transform Evolutional Rules of Chasmic Cycles in Pinghu Slope of Xihu Depression of East China Sea. *Journal of Oil and Gas Technology*, 32 (3): 7—12 (in Chinese with English abstract).
- Li, S.L., Xu, L., Yu, X.H., et al., 2018. Marine Transgressions and Characteristics of Tide-Dominated Sedimentary Systems in the Oligocene, Xihu Sag, East China Sea Shelf Basin. *Journal of Palaeogeography*, 20 (6): 1023—1032 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.H., Zhu, H.T., Shu, Y., et al., 2015. Provenance Systems and Their Control on the Beach-Bar of Paleogene Enping Formation, Enping Sag, Pearl River Mouth Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 36 (3): 286—299 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Q.H., Zhu, X.M., Li, S.L., et al., 2016. Pre-Palaeogene Bedrock Distribution and Source-to-Sink System Analysis in the Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 41 (11): 1935—1949 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.134>
- Liu, Q.H., Zhu, X.M., Li, S.L., et al., 2017. Source-to-Sink System of the Steep Slope Fault in the Western Shaleitian Uplift. *Earth Science*, 42 (11): 1883—1896 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.119>
- Lu, J.Z., Ye, J.R., Huang, S.B., et al., 2009. Characteristics and Hydrocarbon Generation-Expulsion Histories of Source Rocks of Pingbei Area in Xihu Depression. *Offshore Oil*, 29 (4): 38—43 (in Chinese with English abstract).
- Qin, L.Z., Liu, J.S., Li, S., et al., 2017. Characteristics of Zircon in the Huagang Formation of the Central Inversion Zone of Xihu Sag and Its Provenance Indication. *Petroleum Geology & Experiment*, 39 (4): 498—504, 526 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J.Y., Hu, X.Y., Zhang, J.X., 1998. The Late Mesozoic Tectonic Activation in the Eastern Chinese Continent and Its Evolution Progress. *Geotectonica et Metallogenia*, 22 (2): 89—96 (in Chinese with English abstract).
- Sømme, T.O., Helland-Hansen, W., Martinsen, O.J., et al., 2009. Relationships between Morphological and Sedimentological Parameters in Source-to-Sink Systems: A Basis for Predicting Semi-Quantitative Characteristics in Subsurface Systems. *Basin Research*, 21 (4): 361—387. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2009.00397.x>
- Sømme, T.O., Jackson, C.A.L., 2013. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the Møre-Trondelag Area of Southern Norway: Part 2—Sediment Dispersal and Forcing Mechanisms. *Basin Research*, 25 (5): 512—531. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2013.01132.x>

- org/10.1111/bre.12014
- Sømme, T.O., Jackson, C.A.L., Vaksdal, M., 2013. Source-to-Sink Analysis of Ancient Sedimentary Systems Using a Subsurface Case Study from the More-Trøndelag Area of Southern Norway: Part 1—Depositional Setting and Fan Evolution. *Basin Research*, 25 (5): 489—511. <https://doi.org/10.1111/bre.12013>
- Wei, X.S., Zhu, H.T., Xu, C.G., et al., 2017. Pinchout Point Prediction of Thin Inter-Beds Based on Forward Modeling Method: An Example from BZ12 Block of Bohai Sag, Bohai Bay Basin. *Geological Science and Technology Information*, 36(2): 265—271 (in Chinese with English abstract).
- Wu, F.D., Lu, Y.C., Ruan, X.Y., et al., 1996. Application of Heavy Minerals Cluster Analysis to Study of Clastic Sources and Stratigraphic Correlation. *Geoscience*, 10 (3): 397—403 (in Chinese with English abstract).
- Wu, J.P., Zhang, L., Wan, L.F., et al., 2017. Provenance Analysis of Pinghu Formation in Xihu Sag. *China Petroleum Exploration*, 22(2): 50—57 (in Chinese with English abstract).
- Yang, C.H., Gao, Z.H., Jiang, Y.M., et al., 2013. Reunderstanding of Clastic Rock Sedimentary Facies of Eocene Pinghu Formation in Pinghu Slope of Xihu Sag. *Journal of Oil and Gas Technology*, 35(9): 11—14 (in Chinese with English abstract).
- Yu, X.H., Li, S.L., Cao, B., et al., 2017. Oligocene Sequence Framework and Depositional Response in the Xihu Depression, East China Sea Shelf Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(2): 299—314 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, W., Xu, X.H., Zhou, X.J., 2014. The New Geochronology Results of the Pinghu Formation in Xihu Depression: Evidence from the SHRIMP Zircon U-Pb Ages of the Volcanic Rocks. *Geological Journal of China Universities*, 20(3): 407—414 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, H.L., Zhao, W.Z., Xu, Z.H., et al., 2018. Carbonate Seismic Sedimentology: A Case Study of Cambrian Longwangmiao Formation, Gaoshiti-Moxi Area, Sichuan Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 45(5): 775—784 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.P., Xu, F., Zhong, T., et al., 2012. Sequence Stratigraphy Models and Sedimentary Evolution of Pinghu and Huagang Formations in Xihu Trough. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 32(1): 35—41 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J.P., Yu, Y.F., Zhang, T., et al., 2013. A Discussion on the Exploration Potential of Deep Basin Gas in Xihu Sag, East China Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 25 (2): 24—29, 35 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S.L., Zhang, J.P., Tang, X.J., et al., 2014. Geometry Characteristics of the Fault System in Xihu Sag in East China Sea and Its Formation Mechanism. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 87—94 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, X.H., Yu, Y.X., Tang, L.J., et al., 2010. Cenozoic Offshore Basin Architecture and Division of Structural Elements in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas*, 22(5): 285—289 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.T., Liu, K.Y., Du, Y.S., et al., 2009. Quantitative Simulation and New Consideration on the Transformation System of the Accommodation Space. *Earth Science*, 34(5): 819—828 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H.T., Li, M., Liu, K.Y., et al., 2010. Sequence Stratigraphic Architectures of Intra-Cratonic Basin and Its Controlling Factors. *Earth Science*, 35(6): 1035—1040 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.117>
- Zhu, H.T., Li, S., Liu, H.R., et al., 2016. The Type and Implication of Migrated Sequence Stratigraphic Architecture in Continental Lacustrine Rift Basin: An Example from the Paleogene Wenchang Formation of Zhu I Depression, Pearl River Mouth Basin. *Earth Science*, 41 (3): 361—372 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.028>
- Zhu, H.T., Liu, K.Y., Zhu, X.M., et al., 2018. Varieties of Sequence Stratigraphic Configurations in Continental Basins. *Earth Science*, 43(3): 770—785 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.906>
- Zhu, H.T., Liu, Y.M., Liu, K.Y., et al., 2013. Source-Ward Retro-Gradational Stacking Patterns of Sequence Stratigraphic Architectures of Intra-Cratonic Basin: One Example from Shanxi Formation of Ordos Basin, China. *Earth Science*, 38(4): 776—782 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.075>
- Zhu, H.T., Xu, C.G., Zhu, X.M., et al., 2017. Advances of the Source-to-Sink Units and Coupling Model Research in Continental Basin. *Earth Science*, 42(11): 1851—1870 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.117>

## 附中文参考文献

- 蔡华, 张建培, 2013. 东海西湖凹陷平湖斜坡带断层特征及其封闭性. 海洋地质前沿, 29(4): 20—26.
- 蔡华, 张建培, 唐贤君, 2014. 西湖凹陷断裂系统特征及其控藏机制. 天然气工业, 34(10): 18—26.
- 段冬平, 蔡华, 阮建新, 等, 2015. X 油气田 PH 组沉积微相精细研究——以 FHT 地区为例. 海洋石油, 35(1): 42—46.

- 高伟中,田超,赵洪,等,2015.西湖凹陷平湖斜坡带非构造油气藏勘探潜力探讨.海洋石油,35(1):22—26.
- 胡望水,蔡峰,胡芳,等,2010.东海西湖凹陷平湖斜坡带裂陷期变换构造特征及其演化规律.石油天然气学报,32(3):7—12.
- 李顺利,许磊,于兴河,等,2018.东海陆架盆地西湖凹陷渐新世海侵作用与潮控体系沉积特征.古地理学报,20(6):1023—1032.
- 刘强虎,朱红涛,舒誉,等,2015.珠江口盆地恩平凹陷古近系恩平组物源体系及其对滩坝的控制.石油学报,36(3):286—299.
- 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等,2016.沙垒田凸起前古近系基岩分布及源—汇过程.地球科学,41(11):1935—1949.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.134>
- 刘强虎,朱筱敏,李顺利,等,2017.沙垒田凸起西部断裂陡坡型源—汇系统.地球科学,42(11):1883—1896.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.119>
- 陆俊泽,叶加仁,黄胜兵,等,2009.西湖凹陷平北地区烃源岩特征及生排烃史.海洋石油,29(4):38—43.
- 秦兰芝,刘金水,李帅,等,2017.东海西湖凹陷中央反转带花岗组锆石特征及物源指示意义.石油实验地质,39(4):498—504,526.
- 任建业,胡祥云,张俊霞,1998.中国大陆东部晚中生代构造活动及其演化过程.大地构造与成矿学,22(2):89—96.
- 魏小松,朱红涛,徐长贵,等,2017.基于正演模拟技术的薄互层岩性体尖灭点解释外推:以渤中凹陷12构造区为例.地质科技情报,36(2):265—271.
- 武法东,陆永潮,阮小燕,等,1996.重矿物聚类分析在物源分析及地层对比中的应用.现代地质,10(3):397—403.
- 吴嘉鹏,张兰,万丽芬,等,2017.西湖凹陷平湖组物源分析.中国石油勘探,22(2):50—57.
- 杨彩虹,高兆红,蒋一鸣,等,2013.西湖凹陷平湖斜坡带始新统平湖组碎屑沉积体系再认识.石油天然气学报,35(9):11—14.
- 于兴河,李顺利,曹冰,等,2017.西湖凹陷渐新世层序地层格架与沉积充填响应.沉积学报,35(2):299—314.
- 袁伟,徐旭辉,周小进,2014.西湖凹陷平湖组时代新认识:来自火山岩 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄的证据.高校地质学报,20(3):407—414.
- 曾洪流,赵文智,徐兆辉,等,2018.地震沉积学在碳酸盐岩中的应用——以四川盆地高石梯—磨溪地区寒武系龙王庙组为例.石油勘探与开发,45(5):775—784.
- 张建培,徐发,钟韬,等,2012.东海陆架盆地西湖凹陷平湖组—花岗组层序地层模式及沉积演化.海洋地质与第四纪地质,32(1):35—41.
- 张建培,余逸凡,张田,等,2013.东海西湖凹陷深盆气勘探前景探讨.中国海上油气,25(2):24—29,35.
- 张绍亮,张建培,唐贤君,等,2014.东海西湖凹陷断裂系统几何学特征及其成因机制.海洋地质与第四纪地质,34(1):87—94.
- 周心怀,余一欣,汤良杰,等,2010.渤海海域新生代盆地结构与构造单元划分.中国海上油气,22(5):285—289.
- 朱红涛,Liu,K.Y.,杜远生,等,2009.可容纳空间转换系统的定量模拟.地球科学,34(5):819—828.
- 朱红涛,李敏,刘可禹,等,2010.陆内克拉通盆地层序地层构型及其控制因素.地球科学,35(6):1035—1040.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2010.117>
- 朱红涛,李森,刘浩冉,等,2016.陆相断陷湖盆迁移型层序构型及意义:以珠I坳陷古近系文昌组为例.地球科学,41(3):361—372.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2016.028>
- 朱红涛,刘可禹,朱筱敏,等,2018.陆相盆地层序构型多元化体系.地球科学,43(3):770—785.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.906>
- 朱红涛,刘依梦,刘可禹,等,2013.陆内克拉通盆地“溯源退积”层序构型构建:以鄂尔多斯盆地山西组为例.地球科学,38(4):776—782.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2013.075>
- 朱红涛,徐长贵,朱筱敏,等,2017.陆相盆地源—汇系统要素耦合研究进展.地球科学,42(11):1851—1870.  
<https://doi.org/10.3799/dqkx.2017.117>