

西秦岭洮河盆地上三叠统窄陆架型海底扇发育特征与输运机制

谈明轩¹,袁赛赛¹,陈绵培¹,孙浩南¹,马宏霞²,章诚诚³

(1. 河海大学 海洋学院,江苏 南京 210098;2. 中国石油 杭州地质研究院,浙江 杭州 310023;

3. 中国地质调查局 南京地质调查中心,江苏 南京 210016)

摘要:西秦岭洮河盆地上三叠统出露一系列窄陆架控制的海底扇体系,是古特提斯洋东北缘最后一期深海相沉积记录。通过临潭-卓尼地区上三叠统纳鲁组典型露头野外与室内精细沉积学解剖,明确该海底扇的沉积组合、沉积单元和成因机制。研究表明,研究区上三叠统海底扇发育多种类型重力流沉积,具有低密度与高密度浊流沉积、混合事件层、异重岩和反射型浊流沉积等4种沉积组合。目前大部分深水露头反映了海底扇中-远端沉积面貌,以海底扇朵体内部沉积单元(如朵叶体水道、轴部、离轴和边缘等)为特征,而海底扇主水道与天然堤单元不甚发育。洮河盆地上三叠统窄陆架型海底扇的形成并不是由单一输运机制主导。斜坡失稳与陆架沿岸流改造为间接供源,异重流输运为直接供源。这两种机制交互主导与陆架特征和海平面高频变化密切相关。窄陆架地形背景与洮河盆地半封闭构造格局密切相关,而海底滑坡频发则提升了海底地形粗糙度。在白龙江隆起持续隆升影响下,促使洮河盆地上三叠统海底扇远端沉积受到反射流局部改造,形成了具有双重成因特征、部分限制性海底扇沉积。

关键词:发育特征;成因机制;窄陆架;海底扇;限制性盆地;上三叠统;西秦岭

中图分类号:TE121.3

文献标识码:A

Developmental characteristics and transport mechanisms of the Upper Triassic submarine fans controlled by narrow shelf in the Taohe Basin, West Qinling Orogenic Belt

TAN Mingxuan¹, YUAN Saisai¹, CHEN Mianpei¹, SUN Haonan¹, MA Hongxia², ZHANG Chengcheng³

(1. College of Oceanography, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China; 2. Hangzhou Research Institute of Geology, PetroChina, Hangzhou, Zhejiang 310023, China; 3. Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: The Taohe Basin, located in the West Qinling Orogenic Belt (WQOB), exhibits a series of exposed Upper Triassic submarine fan systems controlled by narrow shelf, which records the last-stage deep-marine deposition along the northeastern margin of the Paleo-Tethys Ocean. Using field and laboratory sedimentological analyses of typical outcrops, we determine the sedimentary assemblages, sedimentary units, and genetic mechanisms of submarine fans in the Upper Triassic Nalu Formation in the Lintan-Zhuoni areas. The results indicate that the Upper Triassic submarine fans in the study area contain various gravity flow deposits, which show four sedimentary assemblages: low- and high-density turbidites, hybrid event beds, hyperpycnites, and reflected turbidites. Presently, most studied outcrops of deep-water deposits exhibit the mid-to-distal sedimentary features of submarine fans, with the dominance of various sedimentary units in the lobes (e.g., lobe channels, axial and off-axis units of lobes, and lobe fringes). The major feeder channels and natural levees, however, are largely absent in the submarine fans. The narrow shelf-controlled submarine fans of the Upper Triassic in the Taohe Basin are developed by multiple transport mechanisms. Specifically, slope instability and sediment reworking via littoral currents on the shelf are subject to indirect sediment supply, whereas hyperpycnal flows act as a direct sediment source. The alternation between both mechanisms is intimately associated with the shelf

收稿日期:2024-06-27;修回日期:2024-11-28。

第一作者简介:谈明轩(1990—),男,博士、副教授,沉积学与海洋地质学。E-mail: mxtan@hhu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(42372118, 42002117);江苏省自然科学基金项目(BK20200529);中央高校基本业务费项目(2019B06314)。

characteristics and high-frequency sea-level fluctuations. The narrow-shelf setting is closely related to the semi-closed tectonic framework of the Taohe Basin, while frequent submarine landslides have enhanced the ruggedness of the submarine topography. Influenced by the continuous uplift of the Bailongjiang Uplift, the distal deposits of the Upper Triassic submarine fans in the Taohe Basin are locally transformed by reflected currents, leading to the formation of the partially restricted submarine fan deposits with dual genetic characteristics.

Key words: developmental characteristics, genetic mechanism, narrow shelf, submarine fan, restricted basin, Upper Triassic, West Qinling Orogenic Belt (WQOB)

引用格式:谈明轩,袁赛赛,陈绵培,等. 西秦岭洮河盆地上三叠统窄陆架型海底扇发育特征与运输机制[J]. 石油与天然气地质, 2025, 46(3): 894–909. DOI: 10. 11743/ogg20250313.

TAN Mingxuan, YUAN Saisai, CHEN Mianpei, et al. Developmental characteristics and transport mechanisms of the Upper Triassic submarine fans controlled by narrow shelf in the Taohe Basin, West Qinling Orogenic Belt[J]. Oil & Gas Geology, 2025, 46(3): 894–909. DOI: 10. 11743/ogg20250313.

窄陆架型海底扇是形成于狭窄大陆架地形格局下的深海重力流复合沉积体,主要分布于主动陆缘、海相裂谷和成熟被动陆缘,少部分也发育于欠补偿型被动陆缘和转换型陆缘^[1]。与宽陆架型海底扇相比,该类型海底扇多具有砂地比相对高、海底扇规模相对小和朵叶体主导等特征^[2–4],是全球深水油气勘探的重要目标之一,如加利福尼亚盆地群^[5]、北海盆地维京或中央地堑^[6]、东非鲁伍马盆地^[7–8]和珠江口盆地深水区渐新统等^[9–10]。由于该类型海底扇能够由河流直接或间接供源,碎屑沉积物在路径系统中滞留时间较短,陆源风化剥蚀信息保存相对完整,因此成为近10年来大陆边缘源–汇系统研究的重点解剖对象^[11–15]。同时,狭窄陆架背景也意味着陆架环流、沿岸流、风暴气旋和沉积物液化失稳等多种外界作用可能将滨浅海沉积物以重力流的形式输运至深水盆地,进而使得窄陆架海底扇的成因机理复杂化^[16–17]。如何在窄陆架海底扇发育特征的研究基础上,阐明其深水沉积物输运过程以及成因机制,仍然是深水沉积学研究中的重点与难点之一。与地震、钻井资料相比,野外露头能够更为直观、细致地揭示窄陆架型海底扇垂向与侧向发育特征,更易于开展针对性的岩石采样与分析测试,为窄陆架型海底扇沉积学分析提供了新的研究视角。

西秦岭洮河盆地沿洮河两岸出露一系列上三叠统海底扇沉积,是华北板块与华南板块碰撞闭合前的最后一期深海–半深海沉积^[18–19]。尽管研究区深水露头沉积受印支期构造变形的影响,无法开展细致的横向对比工作,但依据构造地质与沉积学证据可大致判别不同剖面的新老关系。本研究在过程沉积学理论的指导下,以西秦岭洮河盆地临潭–卓尼地区典型海底扇剖面为研究对象,综合野外剖面宏

观沉积学解剖、室内微观岩矿与组构表征、大地构造与地球化学耦合分析,以揭示窄陆架型海底扇的典型沉积特征和发育机制,从而为深水油气勘探类比沉积学分析和西秦岭造山带油气资源战略选区提供新的研究视角。

1 区域地质概况

洮河盆地是西秦岭造山带中以北部合作–岷县断裂与南部迭山–舟曲断裂为界的负向构造单元,其南部以白龙江隆起与松潘–甘孜造山带的若尔盖盆地相隔^[20–21]。临潭–卓尼地区位于西秦岭洮河盆地中部(图1a,b),主体出露一套上三叠统深水硅质碎屑岩沉积。由于该地区深水沉积现象相对典型且较为丰富,近30年来一直是国内外深水沉积研究的热点地区之一^[22–25]。尽管目前关于该研究区三叠系的构造性质仍然存在较多争议,但近年来相关研究已经认识到西秦岭造山带的洮河盆地与松潘–甘孜造山带的深水盆地存在显著差异^[26]。在南部白龙江隆起的控制下,洮河盆地整体属于半封闭的限制性构造格局,有利于该区窄陆架型海底扇的形成与发育。

洮河盆地三叠系主要由中–下三叠统浅海台地相碳酸盐岩与上三叠统斜坡–盆地相碎屑岩组成(图1c)。上三叠统大河坝组南侧整合接触于中三叠统光盖山组,北侧与上覆新近系临夏组呈角度不整合关系,其一段至三段自下而上分别对应于纳鲁组、卡车组和卓尼组(图2)^[27–28]。其中,纳鲁组位于上三叠统底部,是上述3套地层中沉积水体最深的,其岩性主要为灰色、灰绿色薄层–厚层粉–细砂岩,夹灰色粉砂质泥岩^[22,29]。生物遗迹研究表明,洮河盆地晚三叠世古水深整体不超过2 000 m,处于斜坡–半深

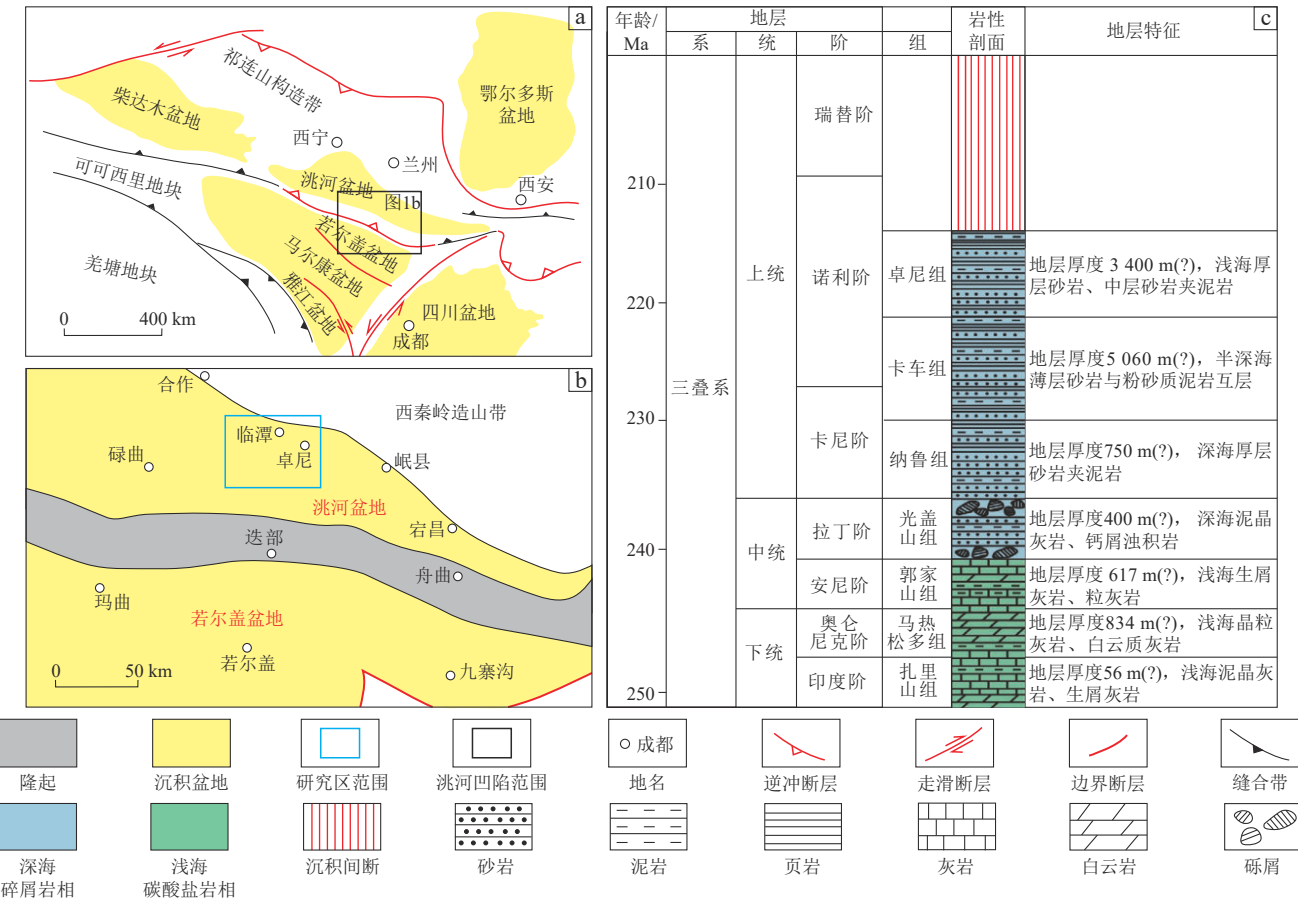


图1 西秦岭洮河盆地区域地质特征(修改自文献[27,31])

Fig. 1 Regional geology of the Taohe Basin, WQOB (modified after references [27,31])

a. 西秦岭及周边地区构造特征;b. 洮河盆地构造特征;c. 地层发育特征

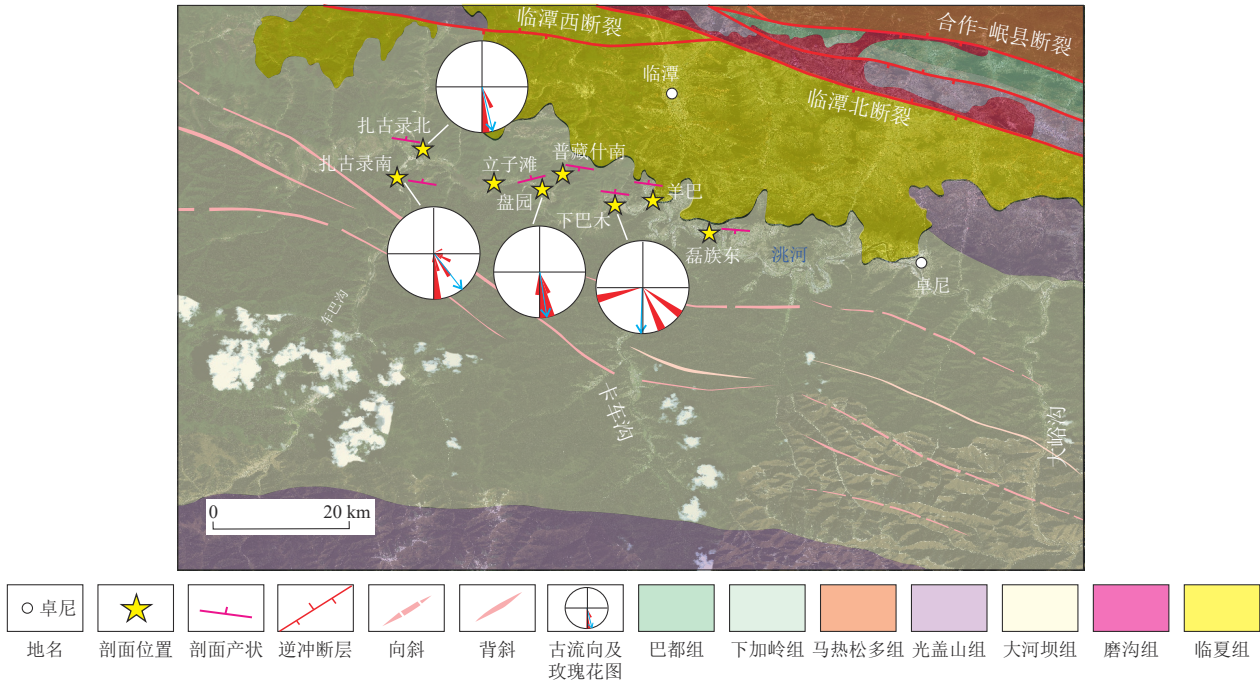


图2 洮河盆地临潭—卓尼地区主要剖面分布相对位置、产状和古水流特征(底图据文献[19]修改)

Fig. 2 Relative locations, attitudes, and paleocurrent characteristics of major outcrops in the Lintan-Zhuoni areas, Taohe Basin (base map modified after reference [19])

海沉积环境^[30]。基于底模构造恢复的古水流方向整体呈 SSE 向或 SSW 向(图 2),这表明西秦岭洮河盆地晚三叠世海底扇自北向南供源,并具有向远端发散的趋势。

2 主要沉积组合及其发育特征

本文基于前人对本区海底扇岩相分类和成因的研究^[19],通过岩相组合特征和相关成因解释,将洮河盆地海底扇沉积分为浊流沉积、混合事件层、异重流沉积和反射型浊流沉积 4 种主要沉积类型。

2.1 浊流沉积

浊流沉积在洮河盆地上三叠统深水沉积中广泛分布,构成了研究区窄陆架型海底扇沉积的主体部分。其岩性主要为灰色细粒(杂)砂岩、极细砂岩和粗粉砂

岩(图 3a),在洮河盆地局部地区(如下巴木剖面)偶见杂基支撑碳酸盐岩-碎屑岩混积型浊积岩(图 3b,c)。该组合沉积物分选中等,磨圆中等-差,结构成熟度中等(图 3a—c)。根据岩性差异,可将其分为砂级与粉砂级两大类岩相组合。其中,砂级岩相组合单层厚度为 0.2~2.0 m,中、下部发育中-厚层块状极细-细砂岩,顶部发育薄层波状交错层理粉砂岩(图 3a,图 4a);粉砂级岩相组合单层厚度整体小于 0.2 m,主要发育薄层递变层理粗粉砂岩、爬升波痕交错层理细粉砂岩和块状泥岩(图 4b)。

在该沉积组合类型中,砂级与粉砂级两大类岩相组合分别解释为高密度浊流和低密度浊流的沉积产物。其中,砂级岩相组合中,下部中-厚层块状极细砂-细砂岩对应高密度浊积岩 Lowe 序列 S3 段(悬浮段),顶部薄层波状交错层理粉砂岩为 Lowe 序列上部 Tt 段(牵引段),这反映了高密度浊流向低密度浊流转

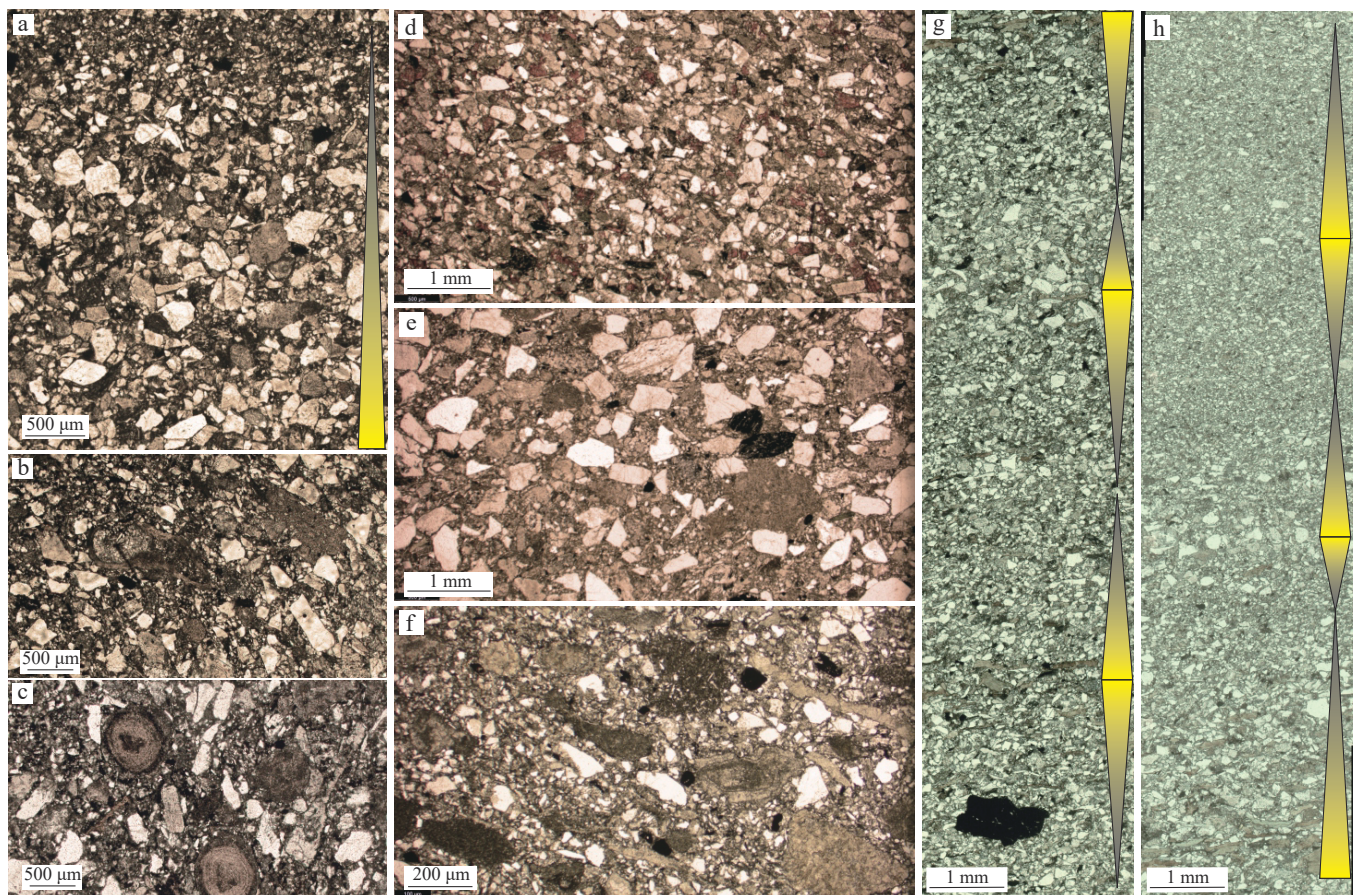


图3 西秦岭洮河盆地上三叠统海底扇主要沉积组合类型岩石薄片显微特征照片

Fig. 3 Photomicrographs of rock thin sections from major sedimentary assemblages in the Upper Triassic submarine fans within the Taohe Basin, WQOB

- a. 正粒序层理粉细砂岩,分选中等,磨圆中等,盘圆剖面;b. 含鲕粒细粒杂砂岩,分选中等,磨圆差,下巴木剖面;c. 含生屑细粒杂砂岩,下巴木剖面;d. 钙质粗粉砂岩,分选好,磨圆中等,磊族东剖面;e. 含泥晶中-细粒杂砂岩,分选差,磨圆中等,羊巴剖面;f. 含生屑细粒杂砂岩,分选差,磨圆中等,羊巴剖面;g,h. 反粒序-正粒序粉砂岩垂向叠置,富含顺层分布颗粒状有机质和黑云母,盘圆剖面

化机制^[32]。粉砂级岩相组合中,薄层粒序层理、爬升波痕交错层理粉砂岩和块状泥岩分别为低密度浊积岩鲍马(Bouma)序列Ta,Tc和Te段。同时,碳酸盐岩-碎屑岩混积型浊积岩的局部发育表明研究区深水沉积体系存在二元或多元沉积物供源机制。

2.2 混合事件层

混合事件层在研究区多个海底扇剖面中均有所发育,常与浊流沉积相伴生。研究区海底扇中发育的混合事件层表现为两种典型组合:一种为下部纯净砂岩H1段与上部泥质砂岩(杂砂岩)H3段组合发育的双层式组合,另一种为底部纯净砂岩H1段、中部泥质砂岩H3段和顶部波状纹层砂岩H4段构成的三层式组合^[19]。根据层厚、粒度和构造特征,先前研究尝试将该混合事件层划分为5种类型^[19]。为简化分类,本研究将洮河盆地上三叠统海底扇沉积中发育的混合事件层整体划分为富泥砾型和贫泥砾型两大类。富泥砾型混合事件层厚度变化较大(单层厚度为0.09~3.03 m),H1段整体岩性为分选较好的粉-细砂岩(图3d),呈块状或递变层理沉积构造;H3段则为分选中等-差的块状细粒杂砂岩、粉砂岩,偶含泥晶、生屑和鲕粒等碳酸盐岩结构组分(图3e,f)。贫泥砾型混合事件层厚度整体较小(单层厚度为0.15~1.30 m),其H3段泥质砂岩内部泥砾含量较小或整体不发育(图4e)。

混合事件层是沉积重力流流体的重要转化产物之一。^[33-34]富泥砾型混合事件层H1段顶部和H3段相对富集分选中等的泥砾(图4c,d),通常与海底浊流侵蚀泥质底床所造成的流体转化密切相关^[19];贫泥砾型混合事件层通常与混合型重力流泥砾的逐渐解体或者过渡性重力流的突然减速和沉积分层有关^[19]。

2.3 异重流沉积

异重流沉积在盘圆剖面中发育较为典型,常与浊流沉积相伴生,但其整体发育频次相对较低。主要岩性为粉砂岩与泥质粉砂岩,单层厚度整体不超过1 m。由于洮河盆地上三叠统所发现的异重流沉积粒度整体偏细,其垂向上粒序构造往往难以识别,给野外识别带来一定困难。对于部分肉眼鉴定的块状砂岩,在大面积拼接岩石薄片发现了多期毫米级反粒序-正粒序沉积构造(图3g,h),并在粉砂级碎屑颗粒间发育丰富的有机质。此外,在盘圆剖面异重流沉积发育层段,其层面内通常富集大量碳化植物茎叶(如植物叶片最大长度超过30 cm,图4f),部分层面甚至可见保存较为完整的新芦木化石(图4g)。

该类型沉积组合的岩石薄片,多期反粒序-正粒序沉积构造的发育能够指示洪水型异重流的流量变化趋势^[35]。其研究区野外剖面中,大量碳化植物碎屑、新芦木化石(未定种)*Neocalamites* sp. 和岩石薄片碎屑颗粒间不同形态有机质的发育,进一步指示了该深水沉积具有典型的陆源输入特征^[36-37]。综合上述宏观微观沉积学证据分析表明,该沉积组合与典型的细粒异重流沉积特征较为相符^[35,38-41],因此异重岩的解释方案可信度较高。

2.4 反射型浊流沉积

反射型浊流沉积是在限制性沉积盆地中发育的浊流沉积^[42-43],通常由浊流受限制性地貌阻碍下形成的反射型浊流沉积所致^[43-46]。受海底限制性地形的影响,反射型浊流的形成往往诱发低幅度短周期内波^[47],与此相应的沉积产物以双向交错层理为特征^[48-49]。本研究在洮河盆地盘圆和扎古录南剖面中均发现了该种沉积类型。整体上,其下部为灰色中-薄层粒序层理粉砂岩,中、上部为灰色薄层双向交错层理粉砂岩与泥质粉砂岩(沉积组合整体厚度小于0.15 m),与深水泥岩和低密度浊积岩相伴生(图5a-c)。此外,双向交错层理粉砂岩中局部还伴生包卷层理,其倾向甚至与流水波痕相反(图5d,e)。

研究区发育的反射型浊流沉积垂向层序与低密度浊积岩较为类似,主要发育鲍马序列Ta,Tc和Te段。其中,灰色中-薄层粒序层理粉砂岩为Ta段,代表低密度浊流的正常沉积作用。灰色薄层双向交错层理粉砂岩与泥质粉砂岩解释为Tc段,表明海底扇远端沉积环境中低密度浊流顶部湍流云团受到海底地形阻碍作用形成与反射型浊流相关的深水牵引流沉积构造^[48]。Tc段中包卷层理的发育则反映了浊流在遭遇海底正向地形反射这一过程中伴生的软沉积变形现象^[48]。

3 沉积单元发育特征

多次野外踏勘与露头解剖表明,尽管洮河盆地上三叠统大部分深水露头的岩性粒度相对偏细(一般不超过中砂级),但主体上仍属于富砂型或砂-泥混合型海底扇。在本研究区的大部分深水露头剖面中,海底扇近端粗粒亚相并不发育,这与前人对西秦岭洮河盆地上三叠统深水沉积的整体认识一致^[18]。基于海底扇相关沉积单元外部形态与充填类型系统研究,认为在洮河盆地上三叠统纳鲁组海底扇主要发育海底扇朵叶沉积。本研究参考海底扇朵叶体系概念模式和沉积

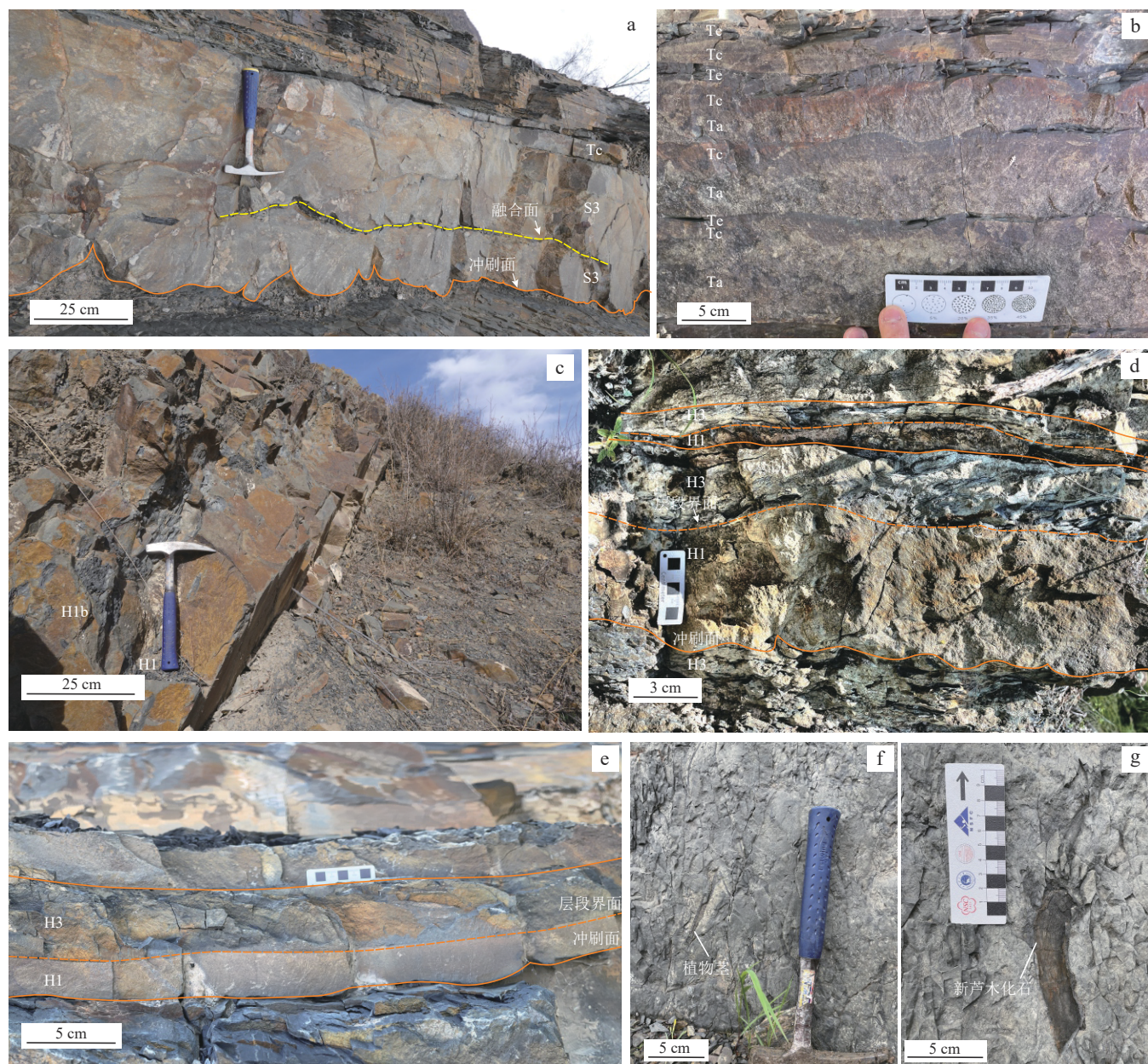


图4 西秦岭洮河盆地上三叠统海底扇浊积岩、混合事件层和异重流沉积野外剖面特征照片

Fig. 4 Pictures showing the outcrop characterization of turbidites, hybrid event beds, and hyperpycnites in the Upper Triassic submarine fans of the Taohe Basin, WQOB

a. 中层高密度浊积岩, 盘圆剖面; b. 多期低密度浊积岩, 盘圆剖面; c. 中层富泥砾型混合事件层, 盘圆剖面; d. 中-薄层富泥砾型混合事件层, 盘圆剖面; e. 薄层贫泥砾型混合事件层, 磊族东剖面; f. 异重岩层面富集碳化植物茎叶碎屑, 盘圆剖面; g. 异重岩层面发现新芦木化石 *Neocalamites* sp., 盘圆剖面

(Ta, Tc 和 Te 分别为经典浊积岩鲍马序列 a, c 和 e 段; H1, H1b 和 H3 分别为混合事件层沉积序列 H1, H1b 和 H3 段; S3 为高密度浊积岩序列 S3 段。)

单元组成(图6),同时结合富砂型海底扇的砂体融合率与砂/地比定量分析^[50-53],在该海底扇朵叶体系中识别出了3种沉积单元,即朵叶体水道、朵叶体近端(朵叶轴部与离轴)和朵叶体远端(图6)。

3.1 朵叶体水道

朵叶体水道是发育于朵叶体内部的分支水道

(图6)^[56]。海底扇朵叶体水道整体由中-厚层高密度浊积岩构成,其单层厚度为0.5~3.0 m。部分朵叶体水道中上部亦充填为混合事件层沉积,可能与该类型水道自旋回摆动或冲决作用存在一定的成因联系^[19]。朵叶体水道在垂直与大角度斜交古水流方向上具有顶平底凸或者透镜状样式(图7a,b),部分单一水道冲刷切割下伏多期薄层天然堤低密度浊流沉积(图7c)。

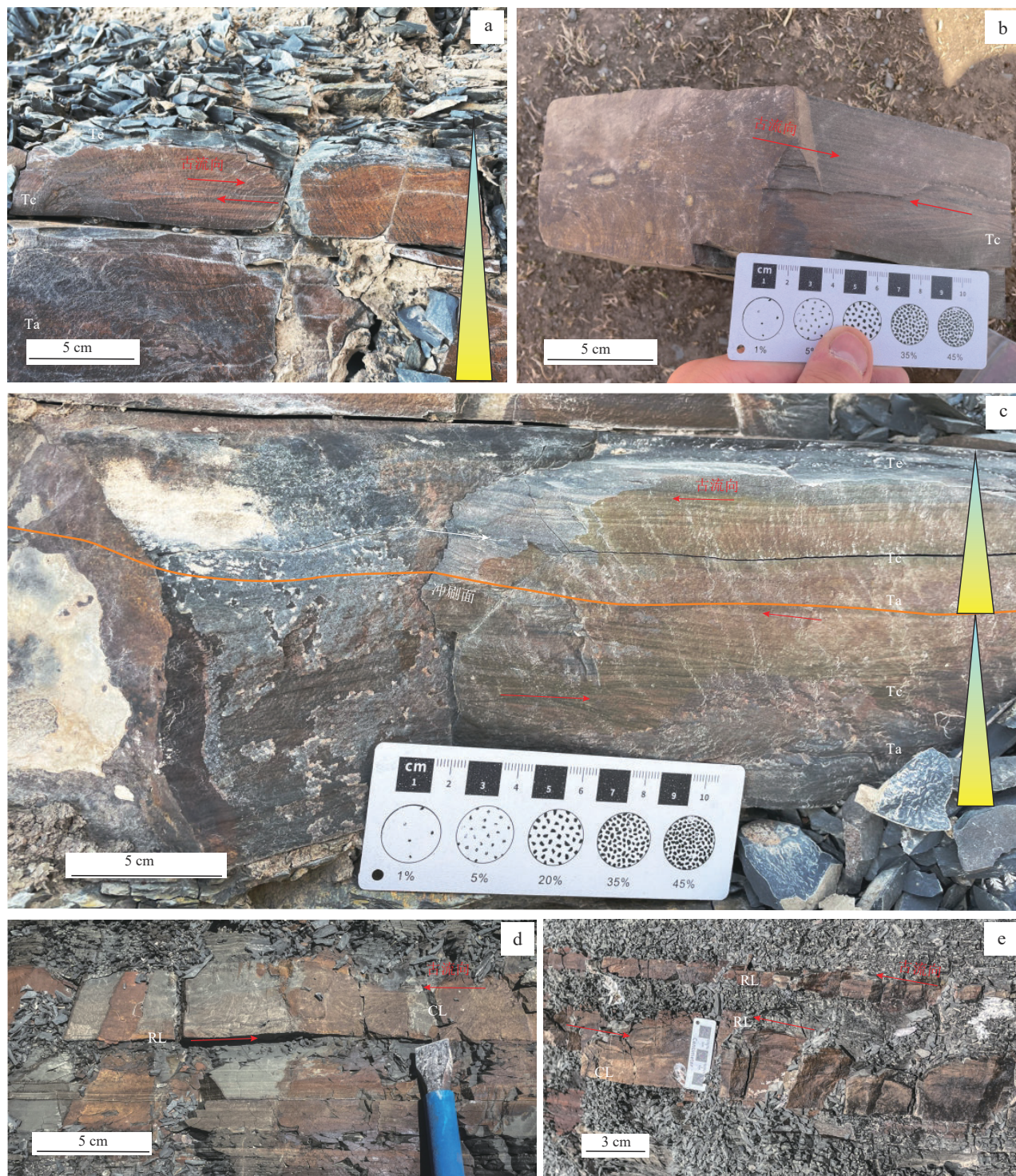


图5 西秦岭洮河盆地上三叠统海底扇反射型浊流沉积野外剖面特征照片

Fig. 5 Pictures showing the outcrop characterization of reflected turbidites in the Upper Triassic submarine fans of the Taohe Basin, West Qinling Orogenic Belt

a. 粒度层理Ta段、双向交错层理Tc段和块状泥岩Te段, 扎古录南剖面; b. 灰色(风化面灰黄色)双向交错层理粉砂岩, 扎古录南剖面; c. 两期反射型浊流沉积垂向叠置, 双向交错层理在Tc段中发育, 扎古录南剖面; d. 灰色泥质粉砂岩, Tc段发育交错层理和包卷层理, 下伏深水背景泥岩沉积, 盘圆剖面; e. 灰色粉砂岩, Tc段发育包卷层理和波状纹层, 指示双向水流, 盘圆剖面

(RL为波痕; CL为包卷层理; Ta, Tc和Te分别为经典浊积岩鲍马序列a, c和e段; H1, H1b和H3分别为混合事件层沉积序列H1, H1b和H3段。)

与海底扇主供水道相比, 该类型深水沉积单元的下切能力相对较弱, 水道规模也远小于主水道, 且多与朵

叶体相伴生。大部分朵叶体水道表现为垂向叠置与侧向拼接为特征(砂体融合率最高可接近100%, 反映朵

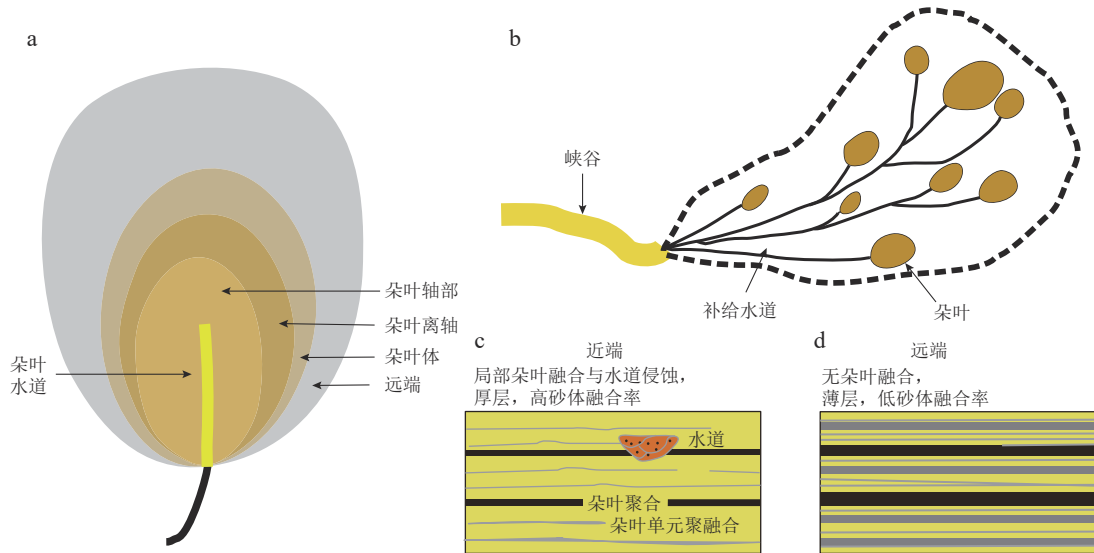


图6 典型海底扇朵叶体系概念模型(a)、沉积单元(b)及剖面样式(c,d)(修改自文献[54-55])

Fig. 6 Conceptual model and sedimentary units of a lobe system in a typical submarine fan and its cross-section (modified after references [54-55])

叶体水道多期叠置与拼接,如图7b),但同时存在少量孤立型朵叶体水道(图7a)。区域野外踏勘研究表明,朵叶体水道在洮河盆地磊族东、下巴木、羊巴和立子滩等多个上三叠统纳鲁组深水露头剖面中均有发现,但在上述剖面中所占比例并不高(整体低于10%)。

3.2 朵叶体近端

海底扇朵叶体近端部分主要发育朵叶体轴部和朵叶体离轴两个单元。由于地层出露连续性有限,朵叶体整体具有板状或席状外形,基本缺乏显著的下切现象(图8a—c)。其中,朵叶体轴部单元的砂/地比整体超过95%,朵叶体叠置程度较高(砂体融合率为60%~100%);朵叶体离轴单元的砂/地比为75%~87%,朵叶体叠置程度中等(砂体融合率为34%~67%)。这两种海底扇单元主要由厚-巨厚层高密度浊流沉积和富泥砾型混合事件层等沉积组合构成,也包含较低比例的中-厚层洪水型异重流沉积。以盘圆剖面为例,该剖面中朵叶体轴部和朵叶体离轴单元的砂/地比均超过75%,其单层厚度整体小于3 m(图9),其中,朵叶体轴部单元以整体厚-巨厚层高密度浊流沉积为主体,而朵叶体离轴中混合事件层占比显著增高(图9)。

3.3 朵叶体远端

海底扇朵叶体远端部分发育朵叶体边缘沉积单元,整体呈板状或席状外形(图8a)。该种沉积单元单层厚度变化较大(0.1~1.5 m),岩性相对较细(一般粉砂级),以中-厚层或薄层粉砂岩与中-薄层泥岩互层

沉积为主要特征。与朵叶体近端沉积单元相比,朵叶体远端沉积具有相对较低的砂/地比与砂体融合率(均整体低于15%)(图8a,d)。朵叶体边缘主体部位表现为中-薄层低密度浊流沉积与贫泥砾型混合事件层互层特征,部分地区也发育较少比例的反射型浊流沉积和细粒异重流沉积,而朵叶体间泥岩包含浊流顶部的薄层Te段泥盖和深海背景沉积(图8b,d)。

4 讨论

4.1 窄陆架地形背景的判别依据

野外沉积学分析表明,西秦岭洮河盆地上三叠统纳鲁组整体缺乏陆架与斜坡相(特别是斜坡水道)沉积,因此认为该时期所发育的海底扇应当具备狭窄陆架-狭窄陆坡的古地貌格局^[18,25]。虽然这种认识与前人提出的多种大地构造认识(如弧前盆地、弧后盆地、裂陷槽或残留海盆等多种观点)并不冲突,但不排除陆架-斜坡沉积由于后期隆升变形而遭受完全剥蚀的可能性。

本研究尝试使用重矿物指数 ATI (磷灰石-电气石指数)作为陆架发育宽窄的重要佐证之一。碎屑磷灰石通常来源于中-酸性岩浆岩母岩,在搬运过程中易于遭受风化,但在沉积之后则相对较为稳定。一般而言,宽陆架沉积物滞留时间较长,碎屑磷灰石遭受陆架环流的长期改造整体含量降低^[57],所对应海底扇碎屑物质的 ATI 也相对较低且变化幅度小;而窄陆架沉积物滞留时间短,大量碎屑物质被直接输运至深水区,所



图7 西秦岭洮河盆地上三叠统海底扇朵叶体水道沉积单元野外剖面特征照片

Fig. 7 Pictures showing outcrop characterization of lobe channels in the Upper Triassic submarine fans of the Taohe Basin, WQOB

- a. 叠置型朵叶体水道下伏朵叶体轴部(垂直于古水流方向), 扎古录北剖面; b. 朵叶体轴部与孤立型朵叶体水道叠置(垂直古水流方向), 磊族东剖面;
c. 下部朵叶体水道上置与多期朵叶体, 中部朵叶体水道下伏天然堤、上覆多期朵叶体(斜交古水流方向), 立子滩剖面

对应的海底扇沉积中碎屑物质 ATi 变化幅度增大,能够更好地保留物源信息^[58]。以洮河盆地盘圆剖面为例,该剖面中海底扇朵叶体砂岩的 ATi 变化幅度较大(变化范围为12.67~85.71),且具有垂向上逐渐增大的趋势(图9)。在垂向百米内的地层,如此高频且大幅度的 ATi 浮动,无法用物源转换(即岩浆岩母岩含量的变化)进行解释,更可能归因于磷灰石的后期变化。深水沉积中能捕捉到 ATi 的波动,也表明沉积物在陆架上滞留时间较短,符合窄陆架发育特征。然而,即使对于窄陆架地形背景,海平面的高频变化仍然强烈影响该区域陆架宽窄变化^[25]。相对低的 ATi 大致对应海平面高位期,陆架相对宽,碎屑磷灰石含量整体降低

(风化时间增长);而相对高的 ATi 则大致对应于海平面低位期,陆架宽度相应减小,碎屑磷灰石含量有所增高(沉积物快速埋藏)。

4.2 海底扇形成机制的多重性探讨

海底扇的潜在形成机制很多,大部分海底扇的形成是由单一成因主导,但部分海底扇的形成可能受到双重、乃至多重机制共同控制^[52]。受秦岭造山带自东向西碰撞闭合的影响,晚三叠世区域古地震活动频繁,如其东北方向相邻的鄂尔多斯盆地同时期延长组发育较好的湖泊相古地震沉积记录^[59-60],同样可能诱发洮河盆地深水斜坡沉积物失稳。事实上,前人已经在



图8 西秦岭洮河盆地上三叠统海底扇朵叶体沉积单元野外剖面特征照片

Fig. 8 Pictures showing the outcrop characterization of lobes in the Upper Triassic submarine fans of the Taohe Basin, WQOB

a. 朵叶体近端与远端全貌, 立子滩剖面; b. 朵叶体内部构型垂向变化变化, 盘圆剖面; c. 朵叶体内部构型垂向变化变化, 扎古录南剖面; d. 朵叶体远端, 盘圆剖面

洮河盆地卓尼地区车巴沟剖面中识别出一定比例的滑塌与揉皱沉积^[24], 本研究则在卓尼地区扎古录南与普藏什南剖面中识别出较为典型的深水(泥质或砂质)滑动与滑塌沉积(图 10a, c)。其中部分滑动、滑塌沉积富含分米级泥岩撕裂屑(图 10b), 表明海底泥岩遭受塑性流体的强烈剪切变形作用, 这进一步证实了斜坡沉积物失稳和其诱发的滑塌型重力流也可能成为该海底扇的运输机制之一。

此外, 本研究中在洮河盆地下巴木与羊巴剖面中发现部分朵叶体浊积岩或混合事件层存在碳酸盐岩—

碎屑岩混合沉积(图 3b, c, f)。以碎屑岩为主体的深水重力流沉积中伴生的鲕粒、生屑和泥晶等浅海碳酸盐岩结构组分, 可能来源于远离河口部位、在窄陆架局限分布的碳酸盐浅滩, 并可能受陆架环流或沿岸流改造, 与陆架碎屑物质一起被混合搬运至陆架边缘, 最终输运至海底扇之中(图 11a)。虽然该深水重力流碳酸盐岩—碎屑岩混合沉积在西秦岭上二叠统、中—下三叠统野外剖面中更为常见^[27], 在上三叠统深水沉积地层中则比例相对较低, 但仍可作为研究区上三叠统海底扇间接供源机制的关键判别依据之一。

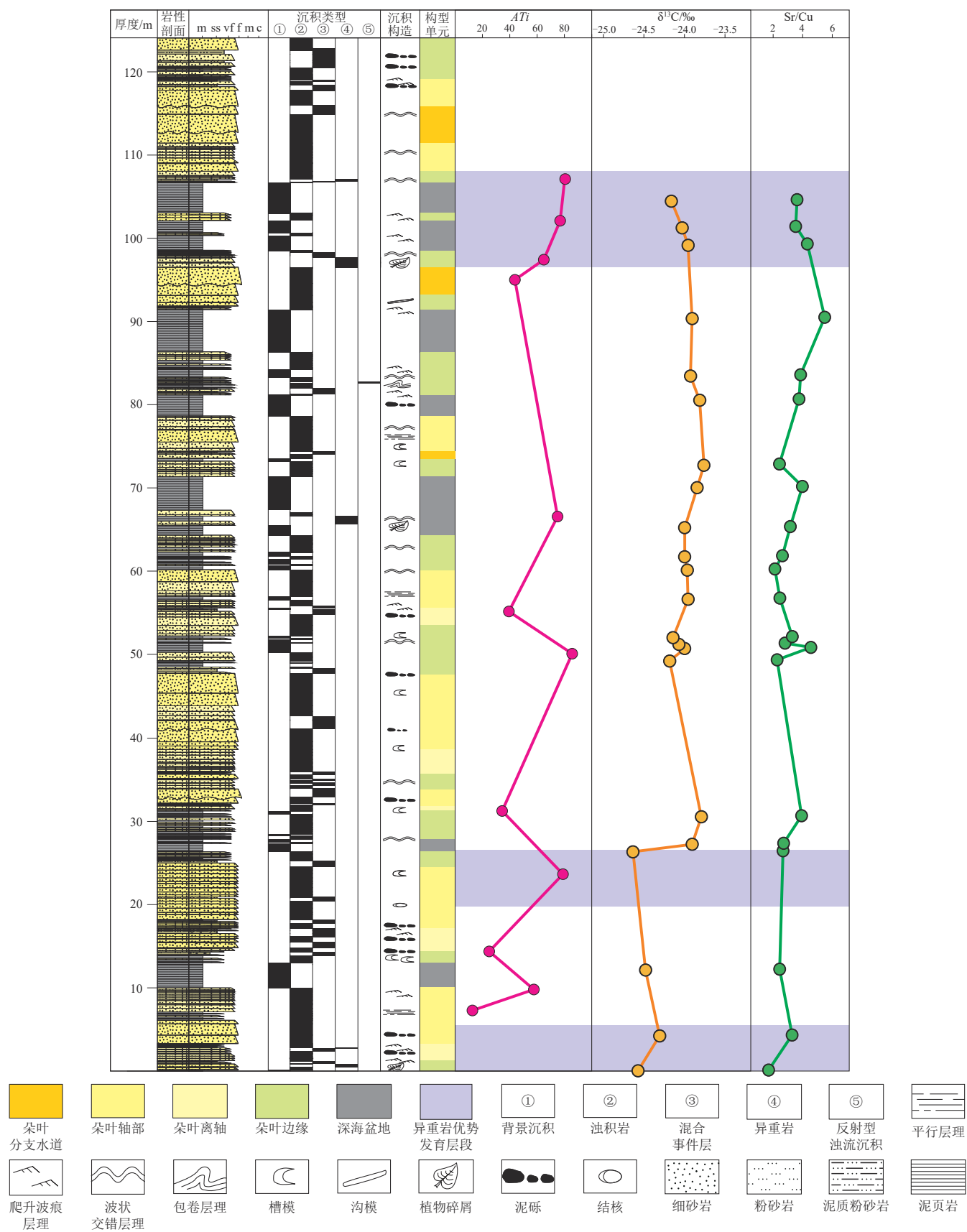


图9 西秦岭洮河盆地盘圆剖面上三叠统海底扇沉积综合柱状图

Fig. 9 Composite stratigraphic column of the Upper Triassic submarine fan deposits in the Panyuan section within the Taohe Basin, WQOB

m. 泥岩; ss. 粉砂岩; vf. 极细砂岩; f. 细砂岩; m. 中砂岩; c. 粗砂岩

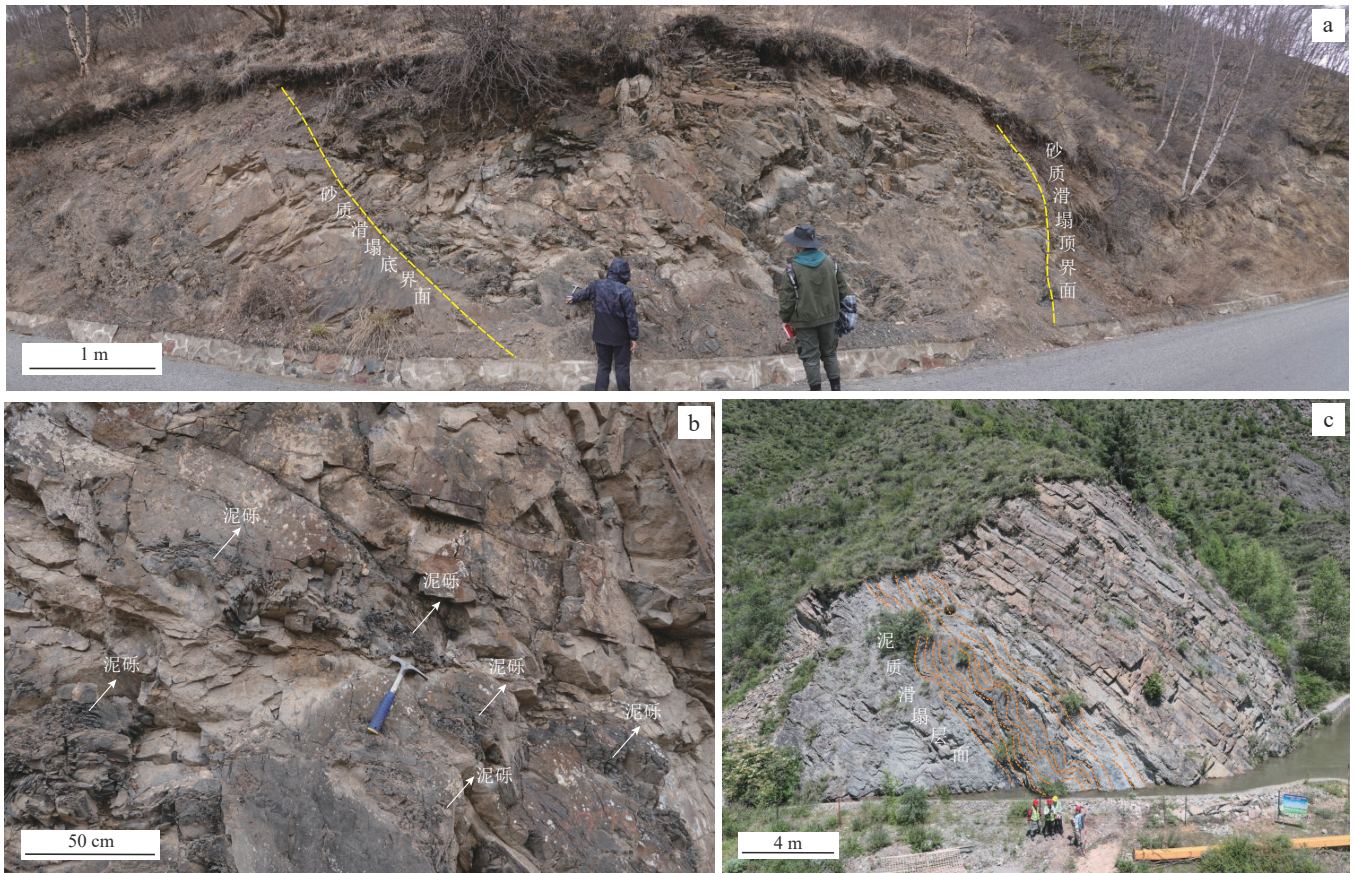


图10 西秦岭洮河盆地上三叠统深水滑动与滑塌沉积野外剖面特征照片

Fig. 10 Pictures showing the outcrop characterization of the Upper Triassic deep-water slides and slumps in the Taohe Basin, WQOB

a. 海底扇朵体上覆大型砂质滑塌沉积, 普藏什南剖面, b. a图中砂质滑塌沉积局部特征, 富含大规模泥岩撕裂屑, 普藏什南剖面, c. 深水泥质滑动沉积上覆海底扇朵体, 扎古录南剖面

研究区上三叠统海底扇中异重流沉积的发现表明,洪水型异重流的直接输运是其重要的运输机制之一。基于研究区盘圆剖面顶部海底扇朵叶体的碎屑锆石最年轻峰值测定为 $236.00 \text{ Ma} \pm 3.30 \text{ Ma}$ (标准偏差 1σ)、碎屑锆石年龄的最大似然性年龄计算值为 $236.90 \text{ Ma} \pm 4.28 \text{ Ma}$ (标准偏差 1σ)^[25], 结合区域强烈岩浆活动的地质背景, 认为该海底扇最可能形成于晚三叠世卡尼期, 这与前人在西秦岭宕昌地区的古生物地层与碳同位素地层对比认识保持一致^[61]。该时期与超级季风相关的强降雨确实有利于海相异重流的形成^[62], 而窄陆架的地形条件进一步促使洪水型异重流有效地下潜至深水区^[38] (图11b)。盘圆剖面底部和顶部层段泥岩 Sr/Cu 元素含量比值均小于4, 其附近砂岩的 ATi 整体超过60 (图9), 综合表明在相对湿润的气候条件下, 大规模洪水能够将碎屑沉积高效输运至深水沉积环境之中, 从而对应于异重流沉积的发育 (图11b)。此外, 剖面底部泥岩有机碳同位素具有负偏趋势 (图9c), 表明深水沉积环境中陆源植物碎屑输入

比例相对增加。同时, 其层面新芦木化石和其他类型植物茎叶碎屑的富集特征 (图4f, g), 也进一步验证了大规模洪水作用对于该海底扇建造过程具有一定贡献。

4.3 深水沉积盆地的限制性及其潜在影响

从构造格局上看, 三叠纪以来, 白龙江隆起的持续抬升, 以及华南与华北板块结合部的剪刀形开口, 使得洮河盆地整体处于半封闭的限制性构造格局。同时, 斜坡沉积物失稳所诱发的深水滑坡进一步提高了洮河盆地海底地形的粗糙度, 使得深水重力流在搬运与沉积过程中极易受到洮河盆地海底限制性地貌、甚至南部白龙江隆起的阻挡作用, 这有助于反射型浊流沉积的发育 (图11a, b)。由于复杂造山带深水地层存在横向对比难的问题, 盆地限制性程度分析需要借助间接性的沉积学证据。例如, 海底扇中-远端沉积中反射型浊流沉积, 以及部分类型中-远端混合事件层的发育 (沉积物重力流遇正向地形强制减速造成流体分层), 均可作为限制性地形发育的间接佐证, 但需注意

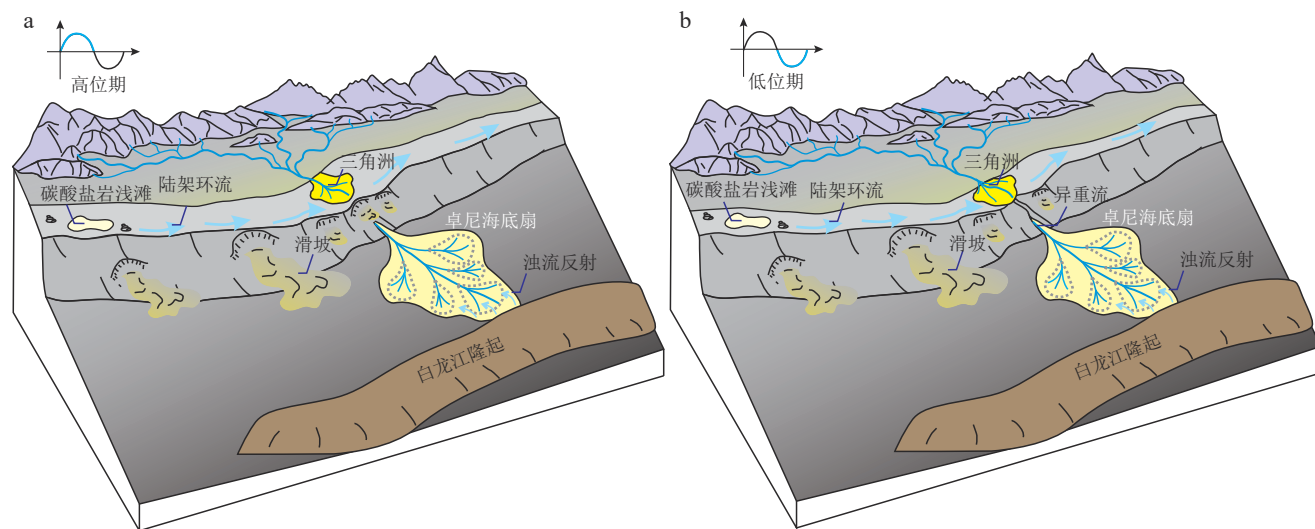


图11 西秦岭洮河盆地上三叠统窄陆架型海底扇沉积过程和发育模式

Fig. 11 Schematic model showing the depositional processes and development of the Upper Triassic narrow shelf-controlled submarine fans in the Taohe Basin, WQOB

a. 海平面高位期, 陆架环流改造与斜坡失稳定主导; b. 海平面低位期, 洪水型异重流输运主导

注意不同类型混合事件层成因的多解性(大部分该类型重力流沉积仍与浊流冲刷泥质底床相关)。

值得注意的是,在过去西秦岭区域深水沉积学研究中,本研究区上三叠统海底扇露头中所识别的反射型浊流沉积被解释为内波-内潮汐沉积^[24,63],但这种沉积组合并非完全符合内波-内潮汐典型的沉积序列发育特征。反射型浊流沉积的形成是由深水浊流沉积、受正向地形反射的内波沉积复合而成,实际上属于一种深水复合流沉积,是沉积盆地限制性程度的重要指示标志之一。野外露头观察表明,研究区目标层段中反射型浊积岩发育比例相对较低,表明海底地貌对海底扇的限制程度并不强。更为系统的深水盆地限制性分析则需要开展深水砂岩厚度与岩性粒度的精细统计学分析,整合定量约束地层厚度分布特征(特别是厚层砂岩层分布样式)^[64-65],这将是后续定量沉积学工作要进一步开展的。

综上所述,综合过程沉积学、物源分析和地球化学等理论认识与分析方法,基于其“源-汇”特性和沉积主控因素分析,能够在一定程度上揭示窄陆架型海底扇的双重或多重成因机制,为该类型海底扇储集体的勘探与开发提供理论支撑。在此野外沉积学研究基础上,结合现代受窄陆架控制的海底扇研究实例,能够进一步细化与完善海底扇沉积相模式。

5 结论

1) 系统的岩相学分类研究与岩相组合精细分析

表明,西秦岭洮河盆地上三叠统纳鲁组海底扇沉积发育多种深水重力流沉积组合,主要包括低密度与高密度浊流沉积、混合事件层、异重岩和反射型浊流沉积4种主要类型。

2) 西秦岭洮河盆地上三叠统纳鲁组深水沉积整体代表了窄陆架型海底扇中-远端的沉积面貌,以发育海底扇朵叶体内部的沉积单元为特征(如朵叶体轴部、朵叶体离轴和朵叶体远端等),局部发育海底扇朵叶体水道沉积,海底扇主水道粗粒沉积和溢岸沉积则相对不发育。

3) 西秦岭洮河盆地上三叠统海底扇沉积物来源不仅包括间接供源作用(陆架环流改造与斜坡沉积物失稳),也包括直接供源作用(由河口直接供源的洪水异重流输运)。窄陆架地形、高频海平面变化以及海底地形变化(地貌限制性程度)都与海底扇重力流沉积的成因紧密相关。

参 考 文 献

- [1] SHANMUGAM G, MOIOLA R J. Submarine fans: Characteristics, models, classification, and reservoir potential [J]. *Earth-Science Reviews*, 1988, 24(6): 383-428.
- [2] 田纳新, 吴高奎, 刘静静, 等. 中大西洋被动陆缘盆地结构特征与勘探领域 [J]. *石油实验地质*, 2023, 45(3): 486-496. TIAN Naxin, WU Gaokui, LIU Jingjing, et al. Structural characteristics and exploration fields in passive continental margin basins of Central Atlantic [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(3): 486-496.
- [3] 张懿, 郑求根, 胡琴, 等. 南大西洋两岸被动陆缘盆地地质特征及其对勘探的影响 [J]. *特种油气藏*, 2023, 30(5): 1-10.

- ZHANG Yi, ZHENG Qiugen, HU Qin, et al. Geologic Characteristics of Passive Continental Margin Basin on Both Sides of the South Atlantic Ocean and Its Impact on Exploration [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2023, 30(5): 1-10.
- [4] SHANMUGAM G. Submarine fans: A critical retrospective (1950-2015) [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2016, 5(2): 110-184.
- [5] REDIN T. Oil and gas production from submarine fans of the Los Angeles Basin [C]. Biddle, K. T., ed., *Active margin basin*, AAPG Memoir 52, Cincinnati, Ohio: American Association of Petroleum Geologists, 1991: 239-260.
- [6] REYNOLDS T. Quantitative analysis of submarine fans in the Tertiary of the North Sea Basin [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1994, 11(2): 202-207.
- [7] 刘子玉, 吕明, 卢景美, 等. 东非鲁伍马盆地窄陆架背景下的深水沉积体系[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(4): 27-34.
- LIU Ziyu, LYU Ming, LU Jingmei, et al. Deepwater depositional system in the background of narrow shelf in the Ruvuma Basin, eastern Africa [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2017, 22(4): 27-34.
- [8] 于星, 赵红岩, 邱春光, 等. 东非海岸盆地第四系深水沉积特征、过程及沉积模式[J]. *断块油气田*, 2024, 31(2): 257-265.
- YU Xing, ZHAO Hongyan, QIU Chunguang, et al. Quaternary deep-water deposition in coastal basins of East Africa: characteristics, processes, and depositional model [J]. *Fault Block Oil & Gas Field*, 2024, 31(2): 257-265.
- [9] 张青林, 张向涛, 李洪博, 等. 南海北部狭窄陆架-断裂陆坡控制的大型深水扇体系[J]. *地球科学*, 2022, 47(7): 2421-2432.
- ZHANG Qinglin, ZHANG Xiangtao, LI Hongbo, et al. Large submarine fan system controlled by narrow continental shelf-faulted continental slope in northern South China Sea [J]. *Earth Science*, 2022, 47(7): 2421-2432.
- [10] 卫哲, 向绪洪, 谢世文, 等. 珠江口盆地白云凹陷古近系源-汇系统耦合及时-空演化[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2024, 54(6): 1927-1939.
- WEI Zhe, XIANG Xuhong, XIE Shiwen, et al. Source-to-Sink System Coupling and Time-Space Evolution of Paleogene in Baiyun Sag, Pearl River Mouth Basin [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2024, 54(6): 1927-1939.
- [11] COVAULT J A, GRAHAM S A. Submarine fans at all sea-level stands: Tectono-morphologic and climatic controls on terrigenous sediment delivery to the deep sea [J]. *Geology*, 2010, 38(10): 939-942.
- [12] COVAULT J A, NORMARK W R, ROMANS B W, et al. Highstand fans in the California borderland: The overlooked deep-water depositional systems [J]. *Geology*, 2010, 35(9): 783-786.
- [13] COVAULT J A, ROMANS B W, FILDANI A, et al. Rapid climatic signal propagation from source to sink in a southern California sediment-routing system [J]. *The Journal of Geology*, 2010, 118(3): 247-259.
- [14] SURYA T T, MD A I, Mohamed R S. Reservoir quality evaluation using sedimentological and petrophysical characterization of deep-water turbidites: A case study of Tariki Sandstone Member, Taranaki Basin, New Zealand [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(1): 13-32.
- [15] WU Gaokai, KONG Fanjun, TIAN Naxin, et al. Structural characteristics and deep-water hydrocarbon accumulation model of the Scotian Basin, Eastern Canada [J]. *Energy Geoscience*, 2023, 4(3): 100152.
- [16] JOERGER S T, SMITH M E, BUSCOMBE D, et al. Evidence for littoral convergence and sediment delivery to Mattole submarine canyon, Northern California [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2024, 12: 1377997.
- [17] 李华, 杨朝强, 周伟, 等. 莺歌海盆地东方1-1气田中新统黄流组浅海多级海底扇形成机理及储层分布[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(2): 429-440.
- LI Hua, YAN Zhaoqiang, ZHOU Wei, et al. Genetic mechanism and reservoir distribution of shallow-marine multi-stepped submarine fans in the Miocene Huangliu Formation of Dongfang 1-1 gas field, Yinggehai Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(2): 429-440.
- [18] WEISLOGEL A L, GRAHAM S A, CHANG E Z. Accumulation of the Middle to Upper Triassic Songpan-Ganzi turbidite complex, China [C]. T. H. Nilsen, R. D. Shew, G. S. Steffens, & J. R. J. Studlick Eds., *Atlas of deep-water outcrops*, AAPG Studies in Geology, Tulsa, Oklahoma: American Association of Petroleum Geologists, 2007, 56: 1-20.
- [19] TAN Mingxuan, SUN Haonan, FU Yilin, et al. Hybrid event bed characteristics and its role in high-frequency facies change of the Upper Triassic submarine fan in the West Qinling area of NE Tibetan Plateau [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 146: 105937.
- [20] 范丽娜. 西秦岭洮河复向斜地质构造基本特征与油气远景预测[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2009.
- FAN Lina. Features of geological structure and potential prediction of oil and gas in the Taohe Syncline of Western Qinling [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2009.
- [21] 李祥辉, 王成善, 刘树根, 等. 西秦岭南部白龙江隆起中三叠统光盖山组岩相及盆地分析意义[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2012, 37(4): 679-692.
- LI Xianghui, WANG Chengshan, LIU Shugen, et al. Lithofacies of the Upper Middle Triassic Guanggaishan Formation in both sides of the Bailongjiang uplift, southwestern Qinling orogenic belt: Implications to the basin analysis [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2012, 37(4): 679-692.
- [22] 殷鸿福, 杨逢清, 黄其胜, 等. 秦岭及邻区三叠系[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992.
- YIN Hongfu, YANG Fengqing, HUANG Qisheng, et al. The Triassic of Qinling mountains and neighboring areas [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992.
- [23] 张晓宝, 方国庆, 何海清. 西秦岭上三叠统海底扇沉积环境特征与模式[J]. *地质科学*, 1996, 31(2): 154-162, 210.
- ZHANG Xiaobao, FANG Guoqing, HE Haiqing. Features and model of sedimentary environments of Upper Triassic seafloor fans in west Qinling Mts [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1996, 31(2): 154-162, 210.
- [24] 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭造山带中三叠统复理石相研究[J]. *沉积学报*, 2001, 19(3): 321-326.

- JIN Huijuan, LI Yuci. A study on Middle Triassic flysch facies in West Qinling orogenic belt [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 321-326.
- [25] TAN Mingxuan, SUN Haonan, FU Yilin, et al. High-frequency temporal variability of provenance signal in the submarine fan with the narrow shelf: Insights from sediment delivery and formation of late Triassic Zhuoni fan in the northeastern Paleo-Tethys Ocean [J]. *Basin Research*, 2024, 36(1): e12835.
- [26] YAN Zhen, FU Changlei, AITCHISON J C, et al. Triassic turbidites in the West Qinling mountains, NW China: Part of the collisional Songpan-Ganzi Basin or an active forearc basin? [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2020, 194: 104366.
- [27] MENG Qingren, QU Hongjie, HU Jianmin. Triassic deep-marine sedimentation in the western Qinling and Songpan terrane [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2007, 50 (S2): 246-263.
- [28] 梁国冰. 西秦岭临潭地区三叠纪地层地质特征与物源分析 [D]. 西安: 长安大学, 2019.
- LIANG Guobing. Geological characteristics and source analysis of the Triassic strata in the Linta area, western Qinling [D]. Xi'an: Xi'an University, 2019.
- [29] 赖旭龙, 杨逢清, 杜远生, 等. 川西北若尔盖一带三叠系层序及沉积环境分析 [J]. *中国区域地质*, 1997, 16(2): 193-199, 204.
- LAI Xulong, YANG Fengqing, DU Yuansheng, et al. Triassic stratigraphic sequence and depositional environment in the Nanping Zoige area northwestern Sichuan [J]. *Regional Geology of China*, 1997, 16(2): 193-199, 204.
- [30] 晋慧娟, 李育慈. 西秦岭二叠纪—三叠纪遗迹化石及其环境意义 [J]. *地质科学*, 1995, 30(4): 321-328.
- JIN Huijuan, LI Yuci. Trace fossils and their environmental significance of Permian-Triassic, western Qinling mountains [J]. *Chinese Journal of Geology*, 1995, 30(4): 321-328.
- [31] 王志鹏. 松潘-阿坝和西秦岭三叠系砂岩组分特征及其构造意义 [J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(5): 465-474.
- WANG Zhipeng. Triassic sandstone compositions in the northern Songpan-Ganzi fold belt and West Qinling, China: Implication for tectonic setting [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2009, 36(5): 465-474.
- [32] LOWE D R. Sediment gravity flows; II, Depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1982, 52(1): 279-297.
- [33] 谈明轩, 朱筱敏, 耿名扬, 等. 沉积物重力流流体转化沉积—混合事件层 [J]. *沉积学报*, 2016, 34(6): 1108-1119.
- TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, GENG Mingyang, et al. The flow transforming deposits of sedimentary gravity flow-hybrid event bed [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2016, 34(6): 1108-1119.
- [34] 操应长, 杨田, 王艳忠, 等. 深水碎屑流与浊流混合事件层类型及成因机制 [J]. *地学前缘*, 2017, 24(3): 234-248.
- CAO Yingchang, YANG Tian, WANG Yanzhong, et al. Types and genesis of deep-water hybrid event beds comprising debris flow and turbidity current [J]. *Earth Science Frontiers*, 2017, 24 (3): 234-248.
- [35] ZAVALA C, PONCE J J, ARCURI M, et al. Ancient lacustrine hyperpycnites: A depositional model from a case study in the Rayoso Formation (Cretaceous) of west-central Argentina [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2006, 76(1): 41-59.
- [36] 熊亮, 曹勤明, 张玲, 等. 细粒沉积岩岩相划分类型及其油气勘探意义——以四川盆地川西坳陷须家河组五段为例 [J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(5): 548-558.
- XIONG Liang, CAO Qinming, ZHANG Ling, et al. Types of fine-grained sedimentary rocks assemblage and its significance for shale oil exploration: A case study of the fifth member of Xujiahe Formation in western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(5): 548-558.
- [37] 李振明, 熊伟, 王斌, 等. 准噶尔盆地哈山地区二叠系风城组细粒沉积特征与演化模式 [J]. *石油实验地质*, 2023, 45(4): 693-704.
- LI Zhenming, XIONG Wei, WANG Bin, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and evolution model of Permian Fengcheng Formation in Hashan area, Junggar Basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(4): 693-704.
- [38] MULDER T, SYVITSKI J P M, MIGEON S, et al. Marine hyperpycnal flows: Initiation, behavior and related deposits. A review [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20 (6/8): 861-882.
- [39] 陈轩, 陶鑫, 覃建华, 等. 准噶尔盆地吉木萨尔凹陷及周缘二叠系芦苇沟组异重流沉积 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44 (6): 1530-1545.
- CHEN Xuan, TAO Xin, QIN Jianhua, et al. Hyperpycnal flow deposits of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusaer Sag and its peripheries, Junggar Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(6): 1530-1545.
- [40] 施振生, 周天琪. 海相细粒沉积成因机制与有机质富集模式研究进展 [J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(4): 910-928.
- SHI Zhensheng, ZHOU Tianqi. Advances and perspectives in the study of the genetic mechanism and organic matter enrichment models of marine fine-grained sediment [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(4): 910-928.
- [41] 仲米虹, 唐武. 塔北地区三叠纪拗陷湖盆异重流沉积特征及主控因素 [J]. *新疆石油地质*, 2023, 44(1): 1-8.
- ZHONG Mihong, TANG Wu. Sedimentary Characteristics and Controlling Factors of Hyperpycnal Flow in Triassic Depressed Lake Basin, Northern Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2023, 44(1): 1-8.
- [42] EDWARDS D A, LEEDER M R, BEST J L, et al. On experimental reflected density currents and the interpretation of certain turbidites [J]. *Sedimentology*, 1994, 41(3): 437-461.
- [43] KNELLER B, EDWARDS D, MCCAFFREY W, et al. Oblique reflection of turbidity currents [J]. *Geology*, 1991, 19 (3): 250-252.
- [44] PICKERING K T, HISCOTT R N. Contained (reflected) turbidity currents from the Middle Ordovician Cloridorme Formation, Quebec, Canada: An alternative to the antidune hypothesis [J]. *Sedimentology*, 1985, 32(3): 373-394.
- [45] 葛智渊, 许鸿翔. 浊流对复杂构造地貌的水动力和沉积响应

- [J]. 古地理学报, 2023, 25(5): 1090–1117.
- GE Zhiyuan, XU Hongxiang. Hydraulic and sedimentary responses of turbidity current to structurally-controlled topography [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(5): 1090–1117.
- [46] 田纳新, 龚承林, 吴高奎, 等. 重力流与海底地貌动态相互作用下深水沉积体系发育演化——以大西洋赤道段菩提瓜尔盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 15–30.
- TIAN Naxin, GONG Chenglin, WU Gaokui, et al. Development of submarine depositional systems under dynamic interplays between sediment gravity flows and seafloor topography: A case study of the Potiguar Basin on the equatorial Atlantic Ocean [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(1): 15–30.
- [47] PATACCI M, HAUGHTON P D W, MCCAFFREY W D. Flow behavior of ponded turbidity currents [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2015, 85(8): 885–902.
- [48] TINTERRI R, MAZZA T, MAGALHAES P M. Contained-reflected megaturbidites of the Marnoso-arenacea Formation (Contessa key bed) and Helminthoid flysches (northern Apennines, Italy) and Hecho Group (south-western Pyrenees) [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022, 10: 817012.
- [49] TINTERRI R, MUZZI MAGALHAES P, TAGLIAFERRI A, et al. Convolute laminations and load structures in turbidites as indicators of flow reflections and decelerations against bounding slopes. Examples from the Marnoso-arenacea Formation (northern Italy) and Annot Sandstones (South eastern France) [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 344: 382–407.
- [50] MATTERN F. Ancient sand-rich submarine fans: Depositional systems, models, identification, and analysis [J]. *Earth-Science Reviews*, 2005, 70(3/4): 167–202.
- [51] 张磊夫, 王红亮, 李英烈, 等. 砂体融合的定量表征及其对储集层连通性的控制 [J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(2): 205–212.
- ZHANG Leifu, WANG Hongliang, LI Yinglie, et al. Quantitative characterization of sandstone amalgamation and its impact on reservoir connectivity [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2017, 44(2): 205–212.
- [52] 谈明轩, 吴峰, 马皓然, 等. 海底扇沉积相模式、沉积过程及其沉积记录的指示意义 [J]. 沉积学报, 2022, 40(2): 435–449.
- TAN Mingxuan, WU Feng, MA Haoran, et al. Facies model, sedimentary process and depositional record of submarine fans, and their implications [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 435–449.
- [53] 李华, 何幼斌, 谈梦婷, 等. 深水重力流水道-朵叶体系形成演化及储层分布——以鄂尔多斯盆地西缘奥陶系拉什仲组露头为例 [J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 917–928.
- LI Hua, HE Youbin, TAN Mengting, et al. Evolution of and reservoir distribution within deep-water gravity flow channel-lobe system: A case study of the Ordovician Lashenzhong Formation outcrop at western margin of Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 917–928.
- [54] SAPARDINA D W. The role of Froude supercritical flow in active margin basin-floor fans [D]. Golden: Colorado School of Mines, 2023.
- [55] ZHANG Leifu, PAN Mao, LI Zhaoliang. 3D modeling of deepwater turbidite lobes: A review of the research status and progress [J]. *Petroleum Science*, 2020, 17(2): 317–333.
- [56] 张磊夫, 李易隆. 深水浊积朵叶体构型特征——以爱尔兰克萊尔盆地石炭系露头为例 [J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 925–934.
- ZHANG Leifu, LI Yilong. Architecture of deepwater turbidite lobes: A case study of Carboniferous turbidite outcrop in the Clare Basin, Ireland [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 925–934.
- [57] NAUTON-FOURTEU M, TYRRELL S, MORTON A. Heavy mineral variations in mid-Carboniferous deltaic sandstones: Records of a pre-depositional sediment history? [J]. *The Depositional Record*, 2021, 7(1): 52–63.
- [58] HURST A, MORTON A. Provenance models: The role of sandstone mineral-chemical stratigraphy [J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 2013, 386(1): 7–26.
- [59] GAO Yi, JIANG Zaixing, BEST J L, et al. Soft-sediment deformation structures as indicators of tectono-volcanic activity during evolution of a lacustrine basin: A case study from the Upper Triassic Ordos Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 115: 104250.
- [60] TIAN Jingchun, LIANG Qingshao, WANG Feng, et al. Sedimentary records of seismic events in a lacustrine basin of continental depression: A case study of the Triassic Yanchang Formation in the Ordos Basin, Northern China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 228: 105128.
- [61] LI Hanxiao, WANG Miaoyan, ZHANG Muhui, et al. First records of Late Triassic conodont fauna and $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ from the Dengdengqiao section, Dangchang county, Gansu Province, northwestern China [J]. *Journal of Earth Science*, 2021, 32(3): 646–656.
- [62] 孙浩南, 谈明轩, 付亦霖, 等. 西秦岭卓尼地区晚三叠世细粒重力流沉积过程及成因机制研究 [J]. 古地理学报, 2023, 25(6): 1315–1329.
- SUN Haonan, TAN Mingxuan, FU Yilin, et al. Sedimentary processes and genetic mechanisms of the Late Triassic fine-grained gravity flows in Zhuoni area of West Qinling orogenic belt [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2023, 25(6): 1315–1329.
- [63] 晋慧娟, 李育慈, 方国庆. 西秦岭古代地层记录中内波、内潮汐沉积及其成因解释 [J]. 沉积学报, 2002, 20(1): 80–84.
- JIN Huijuan, LI Yuci, FANG Guoqing. Internal-wave and internal-tide deposits in the paleostratigraphic record of the western Qinling mountains and their origin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 80–84.
- [64] MARINI M, FELLETTI F, MILLI S, et al. The thick-bedded tail of turbidite thickness distribution as a proxy for flow confinement: Examples from tertiary basins of central and northern Apennines (Italy) [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 341: 96–118.
- [65] HOU Pengfei, JOBE Z R, WOOD L J. Statistical characterization of a confined submarine fan system: The Pennsylvanian Lower Atoka Formation, Ouachita mountains, USA [J]. *Sedimentology*, 2022, 69(2): 775–797.