

川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇的发现及其油气地质意义

张自力¹,赵立可¹,杨洪志²,聂舟²,杨帅³,钟原¹,周刚¹,严威¹,和源¹,
杨岱林¹,兰才俊¹,戴鑫¹

(1. 中国石油西南油气田分公司 勘探开发研究院,四川 成都 610041;2. 中国石油西南油气田分公司,四川 成都 610051;
3. 成都理工大学 沉积地质研究院,四川 成都 610059)

摘要:四川盆地下寒武统筇竹寺组泥页岩中发育多套含砾粉砂岩沉积,厘清其成因及分布规律对于页岩气的进一步勘探与开发具有重要意义。基于川中地区20余口钻井的岩心和测井资料,结合覆盖德阳-安岳裂陷及其周缘的三维地震资料,探讨了含砾粉砂岩的沉积特征及分布规律,并总结了其沉积模式。研究结果表明:川中地区发育重力流沉积,重力流扇体常夹于灰-深灰色泥页岩中,以含砾粉-细砂岩为主,可见完整的鲍马序列及同沉积变形构造。重力流扇体地震反射剖面上常呈透镜状、蠕虫状及平行强反射3种类型,在平面上呈毯状及朵状展布特征。依据成因,可将川中地区海底扇分为改造型、滑塌型、混合型3种主要沉积类型。依据物质来源及分散特征,建立了三角洲(滨岸)-海底扇、海底扇和三角洲(滨岸)-(等深流改造)海底扇3种沉积组合,并提出了川中地区筇竹寺组海底扇-等深流交互沉积模型及海底扇空间分布模式。筇竹寺组海底扇受控于快速海侵背景下的浊流沉积,其触发机制主要与沿岸流及上升洋流作用有关。海底扇的结构、空间分布及规模主要受控于重力流海底扇的成因机制及沉积期盆地底型结构。川中地区发育的原始堆积以及受等深流改造的毯状、朵状海底扇体被筇竹寺组泥页岩包裹,具有埋深浅、生-储-盖配置条件优的特点,是海相页岩气勘探开发的甜点区,也是四川盆地筇竹寺组增储上产最现实的领域。

关键词:含砾粉砂岩沉积;重力流;等深流;海底扇;筇竹寺组;寒武系;四川盆地

中图分类号:TE121.3 **文献标识码:**A

Discovery of submarine fans in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin and their petroleum geological significance

ZHANG Zili¹, ZHAO Like¹, YANG Hongzhi², NIE Zhou², YANG Shuai³, ZHONG Yuan¹, ZHOU Gang¹,
YAN Wei¹, HE Yuan¹, YANG Dailin¹, LAN Caijun¹, DAI Xin¹

(1. Exploration and Development Research Institute, Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610041, China;
2. Southwest Oil & Gasfield Company, PetroChina, Chengdu, Sichuan 610051, China; 3. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu
University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: Multiple intervals of pebbly siltstone are developed within the shale succession of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin. Clarifying their genesis and distribution patterns is of great significance for advancing shale gas exploration and development. Based on core observation and log data from more than 20 wells in the central Sichuan Basin, together with 3D seismic data covering the Deyang-Anyue rift and its periphery, this study investigated the sedimentary characteristics and distribution patterns of pebbly siltstones and established a depositional model. As indicated by the research results, gravity-flow deposits are well developed in the central Sichuan Basin. Gravity-flow fans are commonly intercalated within gray- to dark-gray shales and are dominated by pebbly siltstone and fine-grained sandstone, with complete Bouma sequences and syndepositional deformation structures. On seismic reflection profiles, these gravity-flow fans typically exhibit three main configurations, namely lenticular, worm-like, and

收稿日期:2025-09-06;修回日期:2026-03-06。

第一作者简介:张自力(1986—),男,博士、高级工程师,沉积盆地分析与油气地质。E-mail: Pipi-D-king@hotmail.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(U2344209);中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(2023ZZ16YJ01)。

parallel high-amplitude reflection types. In plan view, the fan bodies are characterized by blanket-like and lobate geometry. According to their genesis, the submarine fans in the basin can be classified into three major types: reworked, slump-related, and mixed types. Based on sediment provenance and dispersal characteristics, three sedimentary associations are recognized, namely delta (shoreline)-submarine fan, submarine fan, and delta (shoreline)-(contour-current-reworked) submarine fan associations. A submarine fan-contourite interaction depositional model and a spatial distribution model for submarine fans in the Qiongzhusi Formation of the central Sichuan Basin are proposed. It is suggested that the submarine fans of the Qiongzhusi Formation were formed by turbidity current deposition under a rapid transgressive setting, and their triggering mechanisms were primarily related to longshore currents and upwelling. The architecture, spatial distribution, and scale of these submarine fans were mainly controlled by their genetic mechanisms and the basin-floor configuration during deposition. The originally deposited submarine fans, together with blanket-like and lobate submarine fans subsequently reworked by contour currents, are encased within the shales of the Qiongzhusi Formation. Characterized by relatively shallow burial depths and favorable source-reservoir-caprock assemblages, these submarine fan bodies represent sweet spots for marine shale gas exploration and development and constitute the most promising targets for reserve growth and production enhancement in the Qiongzhusi Formation of the Sichuan Basin.

Key words: pebbly siltstone, gravity flow, contour current, submarine fan, Qiongzhusi Formation, Cambrian, Sichuan Basin

引用格式:张自力,赵立可,杨洪志,等. 川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇的发现及其油气地质意义[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(4): 1094–1113. DOI: 10. 11743/ogg20260403.

ZHANG Zili, ZHAO Like, YANG Hongzhi, et al. Discovery of submarine fans in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin and their petroleum geological significance[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(4): 1094–1113. DOI: 10. 11743/ogg20260403.

四川盆地海相页岩气勘探开发已取得重大突破, 探明地质储量超 $2 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 形成了多个千亿方级页岩气大气区, 并实现规模开发^[1], 经过十余年的探索与实践, 已形成一系列关于五峰组-龙马溪组海相页岩气富集高产的理论^[2-4]。借鉴五峰组-龙马溪组页岩气突破经验, 近年来对于下寒武统筇竹寺组勘探也获得了一些发现, 特别是中国石油西南油气田公司在德阳-安岳裂陷内分别部署的资201井和威页1H井相继取得勘探突破(其中资201井测试获 $73.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的工业气流), 证实了筇竹寺组具有巨大的页岩气勘探潜力^[1,5]。

前人研究表明, 四川盆地下筇竹寺组下部形成于由海侵至海退的转换期, 发育缺氧深水陆棚环境中沉积的海相黑色页岩^[6-9], 在盆地不同区域筇竹寺组的沉积厚度、黑色富有机质页岩厚度、岩性组合类型和沉积构造等特征有显著差异^[7,10-12]。区域构造背景、氧化还原环境、古海洋生产力及古气候等对富有机质页岩的形成和保存等具有重要的控制作用, 影响了页岩的品质和分布规律^[13-15]。近期对于川中古隆起筇竹寺组的多口取心井复查结果显示, 筇竹寺组页岩内部广泛发育多套含砾细砂岩、粉砂岩沉积, 其底部与黑色页岩和泥岩呈突变接触, 顶部与上覆岩层呈渐变过渡。然而, 目前对于这些夹层的成因机理、纵向叠置规律及横向

展布特征尚缺乏系统认识, 尤其是对砾石成因的探讨仍相对薄弱。储层类型、岩石学特征及隔夹层的发育等因素, 可能是造成不同页岩气井产量存在巨大差异的重要原因, 严重影响了页岩气的勘探成效。基于前人的研究成果, 本文利用川中地区20余口钻井岩心及测井资料, 结合覆盖于德阳-安岳裂陷及周缘超3500 km²的三维地震资料, 在明确筇竹寺组发育的宏观背景下, 系统梳理其内部这套含砾细砂岩、粉砂岩沉积的成因类型及空间展布特征, 揭示其成因及发育的主控因素, 以期对德阳-安岳裂陷内筇竹寺组海相页岩气和致密砂岩气的勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

1.1 地质概况

四川盆地是一个在上扬子克拉通板块上发展起来的叠合盆地, 盆地基底是中元古代末晋宁运动形成的褶皱基底^[16]。新元古代罗迪尼亚大陆的裂解开启了原特提斯洋演化阶段, 奠定了晚震旦世一早寒武世四川盆地的伸展构造背景^[17-18]。受桐湾构造运动多幕次影响, 四川盆地震旦系灯影组不同程度地被抬升和剥蚀, 形成了近NS向展布的德阳-安岳裂陷(亦称侵蚀

槽),具有“北深、南浅,东陡、西缓”的特征。该裂陷的构造古地貌格局奠定了寒武系麦地坪组-筇竹寺组的沉积充填基础^[1,17,19](图1)。研究区位于川中古隆起核部资阳-威远-蓬萊地区,即德阳-安岳侵蚀槽中段,现今构造属于川中平缓构造带和川西南低褶构造带。

川中地区筇竹寺组是在陆棚环境下受海侵影响形成的广覆式海相页岩地层,在侵蚀槽内与下伏的下寒武统麦地坪组含磷灰岩或含磷白云岩整合接触,在侵蚀槽外与下伏的震旦系灯影组白云岩呈超覆不整合接触,与上覆的下寒武统沧浪铺组砂质泥岩和泥质粉砂岩呈整合接触^[12,20-21](图1a)。筇竹寺组岩性主要为铝

土质泥岩、页岩、凝灰岩和粉砂岩等,厚度为100~1 000 m,主体埋深为3 000~5 000 m;筇竹寺组发育明显受控于侵蚀槽展布,槽内厚度为500~700 m,槽外厚度为100~300 m^[17-18,21-22](图1c)。前人根据沉积旋回、岩性和古生物等特征,将筇竹寺组自下而上划分为第一段和第二段,其中第一段可进一步细分为第一¹亚段和第一²亚段^[17-18,21-23]。

1.2 古环境及物源特征

早寒武世上扬子地区总体处于干旱-潮湿交替的气候条件^[12,24],筇竹寺组形成于快速海进-缓慢海退的

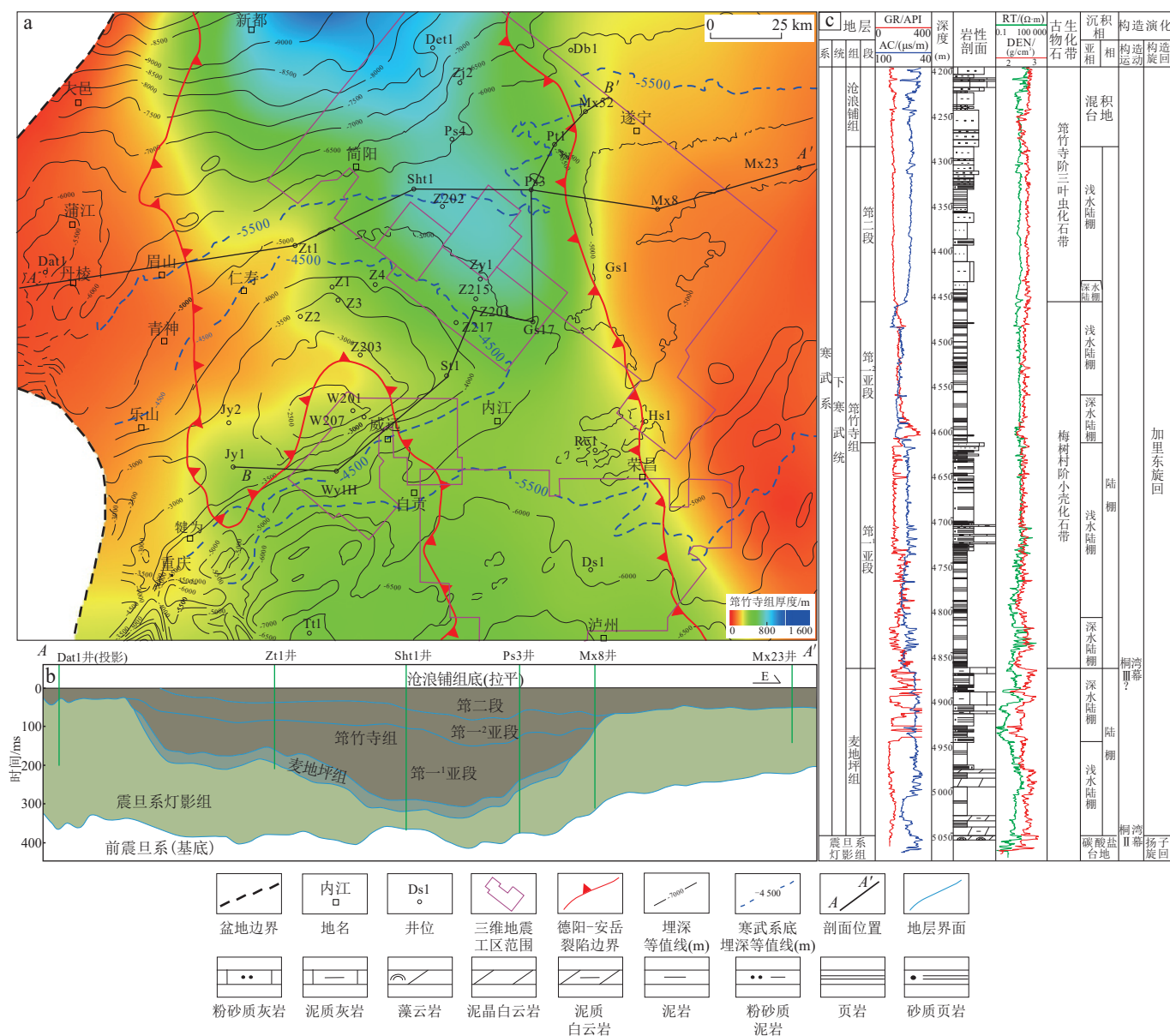


图1 川中地区构造位置及下寒武统筇竹寺组综合柱状图

Fig. 1 Tectonic setting of the central Sichuan Basin and composite stratigraphic column of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation
a. 川中地区筇竹寺组厚度与寒武系底埋深叠合图;b. 过德阳-安岳裂陷震旦系-下寒武统结构简图(拉平沧浪铺组底);c. 川中地区下寒武统筇竹寺组综合柱状图(据文献[17]修改)

沉积背景^[6-7,12],受全球海平面快速上升影响,黑色页岩几乎覆盖了整个上扬子地区^[25]。四川盆地筇竹寺组发育滨岸相和碎屑岩陆棚相沉积,研究区以深水陆棚和浅水陆棚2个亚相为主,依据岩性组合及沉积构造,可进一步划分为硅质泥棚、含粉砂质泥棚、泥质粉砂棚和粉砂棚4种微相。这些微相发育于槽内中心、槽缘斜坡和槽外高地3个地貌单元^[18,23,26-27]。

前人研究表明,受区域性海侵和周缘古陆差异隆升作用的影响,四川盆地筇竹寺组沉积期发育康滇古陆、摩天岭古陆、汉南古陆、宣汉-开江古隆起及司上-万源古隆起^[28-30]。其中,康滇古陆对盆地提供了显著且持续的碎屑供给,其母岩以沉积岩和花岗岩为主,物源区形成于大陆边缘环境^[31]。摩天岭古陆次之,其他古陆贡献较弱且分布相对局限^[29,32]。川中地区德阳-安岳侵蚀槽受周缘古陆直接供源影响较小,整体以粉砂岩和泥岩为主^[30]。

2 海底扇识别特征

在上述区域地质背景下,本次对研究区埋藏型重力流扇体的识别主要基于钻井与地震资料。区别于野外露头观察的直观性,本次分析依托于研究区丰富的筇竹寺组全井段取心资料,结合区域地质背景及钻井岩心、岩-电响应与地震属性的综合标定,实现了对地下地质体的精细解析。

2.1 岩石学特征

川中古隆起及其围斜区筇竹寺组12口井岩心观察结果表明,重力流沉积常夹于灰-深灰色泥页岩中。依据重力流沉积物及其上、下岩性特征,可划分为含砾泥岩组合、含砾泥质粉砂岩与细砂岩组合、细砾岩组合3种类型。

2.1.1 含砾泥页岩组合

该组合岩性以深灰-灰黑色(钙质)泥岩及页岩为主,也可见少量粉砂质泥岩,夹浅灰色泥质粉砂砾和灰黑色泥砾2类砾石(图2)。暗色泥岩段和页岩段通常发育块状及水平层理,砾石类型与结构多样。其中,泥质粉砂岩砾石大小不一,砾石整体呈浅灰-灰白色次圆状或滚圆状,直径为2~8 cm,部分大于10 cm;部分(泥质)粉砂岩可见原始块状层理或水平层理,砾石内侧边缘可见黄铁矿呈近“环边状”胶结,部分砾石内部可见钙质胶结(图2a—f)。大直径砾石多为孤砾产出,其长轴方向通常与层系界面平行,也可见与地层界面

斜交或直立排列,砾石边缘的原始地层结构发生明显的同沉积变形现象(图2a—c)。小粒径砾石多呈集群状产出,其长轴方向与地层界面平行(图2d,e)。泥砾的分选和磨圆程度相对较差,按照产状和结构可分不规则顺层(混杂)堆积及次圆状混合堆积2类,常见呈不规则状、扁平状或撕裂屑状顺层排列(图2g,h);少见磨圆较好的泥砾与粉砂岩砾石混积出现(图2f)。这种砾石大小混杂、定向性差异显著的特征,反映了重力流形成过程中由高密度向低密度转换的复杂搬运机制,以及可能的滑塌触发成因。

2.1.2 含砾泥质粉砂岩与细砂岩组合

该组合岩性由浅灰-灰白色泥质粉砂岩、粉砂岩和细砂岩组成,可见泥质粉砂岩和粉砂岩砾石,也可见少量泥砾(图3)。该类型岩性组合具有多样化的岩石类型及沉积构造。其中,砂岩段内以正粒序和复合正粒序为主,常见鲍马序列C—E段,局部也可见完整的鲍马序列(图3a—f,图4)。

单期正粒序下部(相当于鲍马序列A—C段)为浅灰色钙质(细)砂岩和(粉)砂岩,发育平行层理和块状层理等(图3a,b;图4a,b)。砂岩段含砾,可见撕裂状泥砾,底部可见冲刷面、泄水构造及包卷层理等同沉积构造或同沉积变形构造(图3d,e;图4a,c,e),也可见底部粒序层理段(图3c,f;图4a,d)。

中部(相当于鲍马序列C段和D段)多为浅灰色细砂岩、粉砂岩夹泥岩纹层,缺乏砾石,发育平行层理和波纹层理等,常见包卷层理和滑塌变形构造(图3a,b,f;图4a,c,e)。与鲍马序列相对应的岩性段发育2种不同的沉积现象:①岩心段常见不规则粉砂岩斑块及呈透镜体状和纹层状的粉砂岩与泥质粉砂岩顺层理排列,该岩性段的上、下界面与其他砂岩段及泥页岩段均呈突变接触,且该类型砂岩段同样发育同沉积变形构造(图3e,g)。②粉砂岩、泥质粉砂岩与泥岩混积或交互沉积,砂岩段呈多期透镜状,横向上与泥岩呈渐变过渡;或砂岩段与泥岩段呈互层叠置,整体发育波纹层理或爬升层理(图3j),可能指示长期牵引流沉积作用。

顶部(相当于鲍马序列E段及陆棚沉积)为深灰色、灰黑色泥岩、粉砂岩质泥岩、页岩段,发育水平层理、块状层理,与上覆陆棚泥页岩段及下伏砂岩段均呈渐变过渡接触(图3a,b,f;图4a,d,e)。

2.1.3 细砾岩组合

该组合岩性以灰-浅灰色含砾砂岩为主,主要发育粒序层理和块状层理,砾石成分以灰黑色泥砾为主,

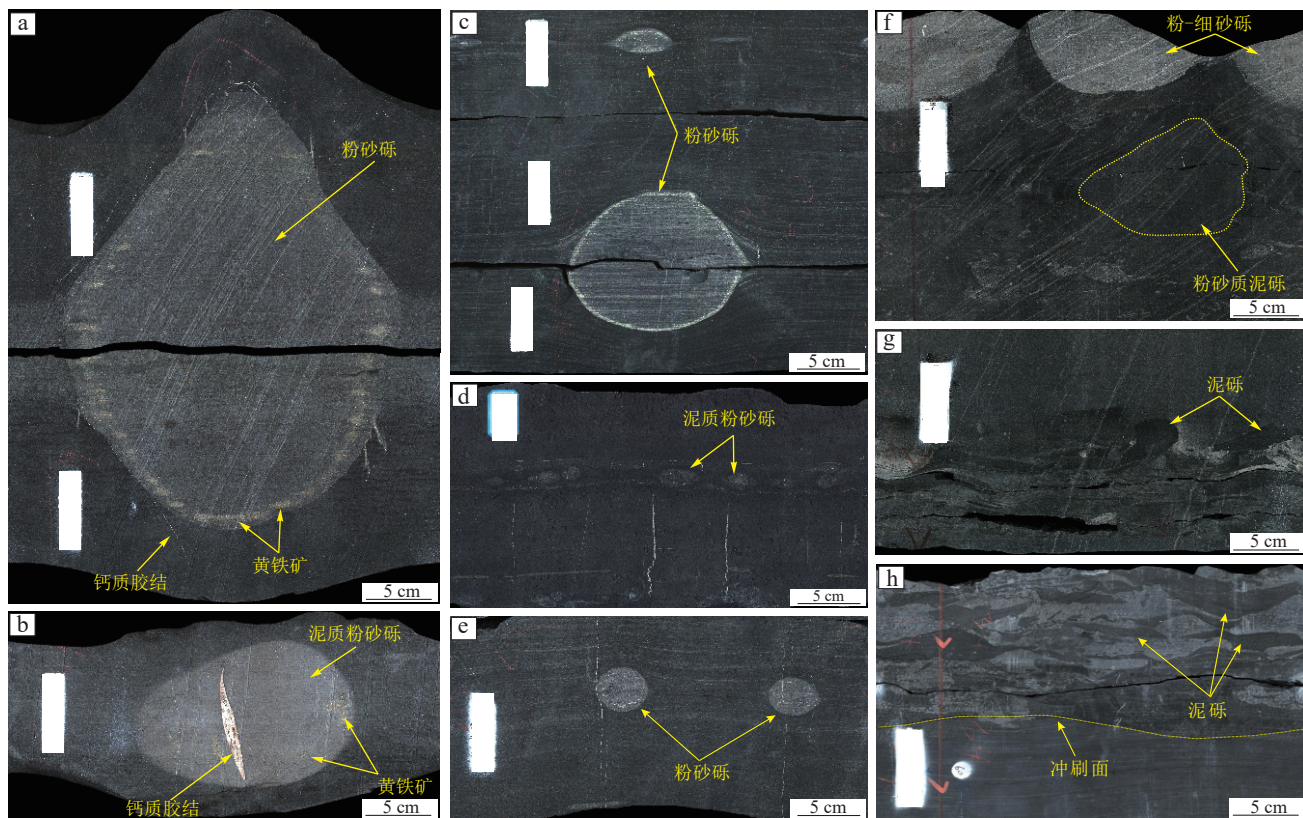


图2 川中地区下寒武统筇竹寺组含砾泥岩岩心滚动扫描照片

Fig. 2 Core scanning images of pebbly mudstone from the Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin

a. 粉砂岩砾石,垂直层面排列,颗粒边缘黄铁矿胶结,颗粒内部纹层状结构,W207井,埋深3 220.51~3 220.97 m;b. 泥质粉砂岩砾石,顺层排列,内部块状结构,钙质胶结,颗粒边缘黄铁矿胶结,W207井,埋深3 228.38~3 228.51 m;c. 平行层理砾石,顺层排列,颗粒周围地层同沉积变形,Gs17井,埋深4 973.37~4 973.66 m;d. 多个泥质粉砂岩砾石,长轴方向顺层排列,颗粒底部地层变形,Z201井,埋深4 851.67~4 851.92 m;e. 粉砂岩砾石,Z202井,埋深4 995.00~4 995.16 m;f. 呈块状结构的浅灰色粉-细砂岩砾石,与块状结构的粉砂质泥砾,Z203井,埋深3 376.15~3 376.45 m;g. 长轴方向顺层排列的不规则灰黑色泥砾,Z203井,埋深3 412.91~3 413.08 m;h. 不规则状、扁平状灰黑色泥砾与粉砂岩混合堆积,Z202井,埋深5 087.93~5 089.98 m

砂砾相对较少。泥砾的分选和磨圆程度差异较大:呈漂浮状杂乱分布的泥砾分选差、磨圆度低,部分明显呈撕裂状(图2g,h;图3h);顺层排列的泥砾分选差,呈次圆状(球度低)(图3i)。细砾岩段底部常见冲刷面,与下伏浅灰色粉-细砂岩段、灰黑色泥岩及粉砂质泥岩段呈突变接触(图3h,i)。顶部与块状层理砂岩及水平层理泥页岩呈渐变接触(图4a,c,e)。

2.2 岩-电特征

基于岩心相分析,识别了川中地区筇竹寺组重力流沉积的岩-电响应特征。受重力流海底扇规模及同沉积期改造作用的影响,单期(套)重力流朵叶体在岩性、垂向厚度、及互层岩性类型上存在差异,导致单井的岩-电特征差异性较为显著(图5)。

2.2.1 块状(粉)砂岩段

该段由厚层的泥质粉砂岩、(含砾)粉砂岩、(含砾)

细砂岩、细砾岩及砂质泥岩(岩屑录井)组成。其中,粉砂岩与细砂岩段单层厚度为1~4 m,累积厚度为6~10 m。自然伽马(GR)曲线呈钟形、变形钟形或中-低值微化齿形特征,电阻率(RT)曲线呈中-低阻齿形特征。块状(粉)砂岩段底部测井曲线可见微幅度基值跳跃现象(图5中Wy1和St1井)。

2.2.2 厚层(粉)砂岩夹薄层泥岩段

该段以厚层泥质粉砂岩、(含砾)粉砂岩、(含砾)细砂岩夹薄层泥岩及页岩组成,其中泥质粉砂岩、粉砂岩和细砂岩段单层厚度为1~3 m,累积厚度为3~8 m。GR曲线主要呈中-低值齿化箱形,不同期次砂体间可见尖刀状高峰。RT曲线呈中-低值齿形及微齿形特征,也可见舌形特征。声波时差(AC)曲线呈低值微齿形特征,岩性界面可见微幅度跳跃(图5中St1和Z201井)。

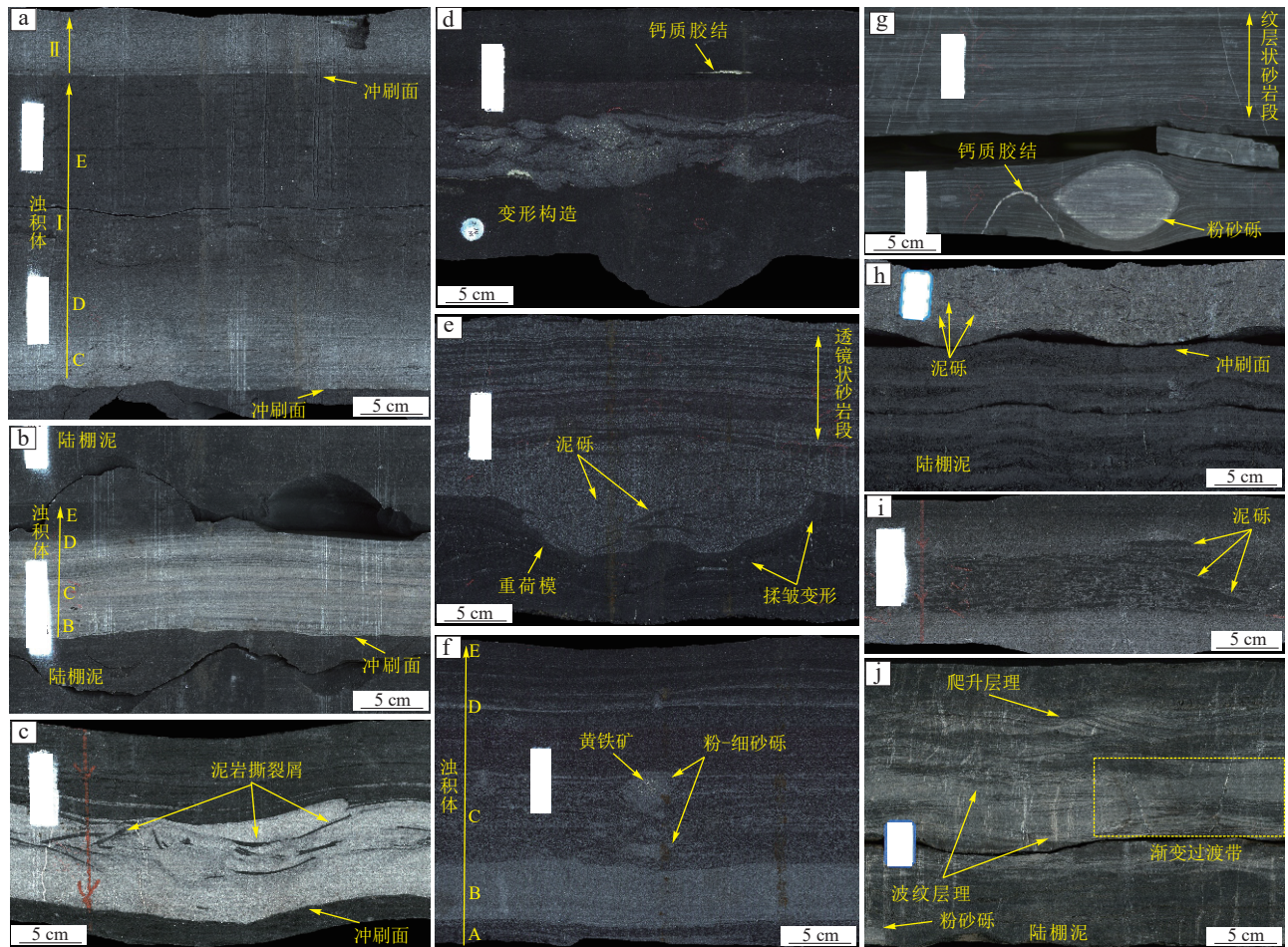


图3 川中地区下寒武统筇竹寺组含砾砂岩及细砾岩岩心滚动扫描照片

Fig. 3 Core scanning images of pebbly sandstone and fine-grained conglomerate from the Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin
a. 两期不完整的鲍马序列纵向叠置, WY1H井, 埋深4 422.74 ~ 4 423.06 m; b. 单期鲍马序列与上覆陆棚泥岩渐变接触, 与下伏陆棚泥岩突变接触, WY1H井, 埋深4 386.03 ~ 4 386.18 m; c. 单期鲍马序列底部粒序层理段, 与上覆泥岩突变接触, Z222井, 埋深4 514.77 ~ 4 514.94 m; d. 泥质粉砂岩, 同沉积变形构造, Z201井, 埋深4 804.83 ~ 4 805.02 m; e. 上部透镜状砂岩段, 下部含泥砾砂岩段, 同沉积变形构造发育 Z201井, 埋深4 874.70 ~ 4 874.93 m; f. 单期完整的鲍马序列, Z201井, 埋深4 802.17 ~ 4 802.40 m; g. 纹层状砂岩段, 可见粉砂岩砾石及钙质胶结, Gs17井, 埋深4 972.05 ~ 4 972.83 m; h. 砂砾岩段, 砾石成分主要以不规则泥砾组成, Z201井, 埋深4 885.78 ~ 4 886.03 m; i. 砂砾岩段, 砾石成分主要以扁平状顺层排列泥岩组成, Z202井, 埋深5 024.18 ~ 5 024.31 m; j. 波纹层理及爬升层理泥质粉砂岩段, 与泥岩渐变接触, Z203井, 埋深3 421.14 ~ 3 421.37 m

2.2.3 薄层(粉)砂岩与(页)泥岩互层段

该段以泥质粉砂岩、(含砾)粉砂岩、(含砾)细砂岩与泥岩以及页岩不等厚互层产出, 其中泥质粉砂岩、粉砂岩、细砂岩段单层厚度为1~2 m, 累积厚度为2~6 m。GR曲线呈现出指状低值, 或齿化中-低值段中出现微齿化低值。RT曲线呈指状高电阻特征。AC曲线呈现低值指状、尖刀状低值特征(图5中Z201和Gs17井)。

2.2.4 厚层泥岩夹薄层(粉)砂岩段

该段以粉砂岩和泥质粉砂岩为主, 厚度通常小于0.5 m(多由岩心观察识别)。相对应的GR、RT和AC曲线形态多为基值附近的微幅度跳跃(图5中Ps3和Pt1井)。

2.3 地震反射特征

研究区重力流海底扇体在地震剖面上表现出显著的非均质性, 其反射构型受扇体发育位置、成因机制及规模尺度的综合控制(图6)。为厘清这种多样性, 本研究以单井合成记录精细标定为基础, 通过解析地震反射构型与异常体空间展布, 将研究区海底扇的地震相归纳为以下3种主要类型。

2.3.1 透镜状地震反射

透镜状地震反射表现为单个或多个低频、连续、强波峰的横向连续性中断。强波峰反射内部发育多组由中频、断续、中-弱波谷构成的反射, 彼此间呈蠕虫状

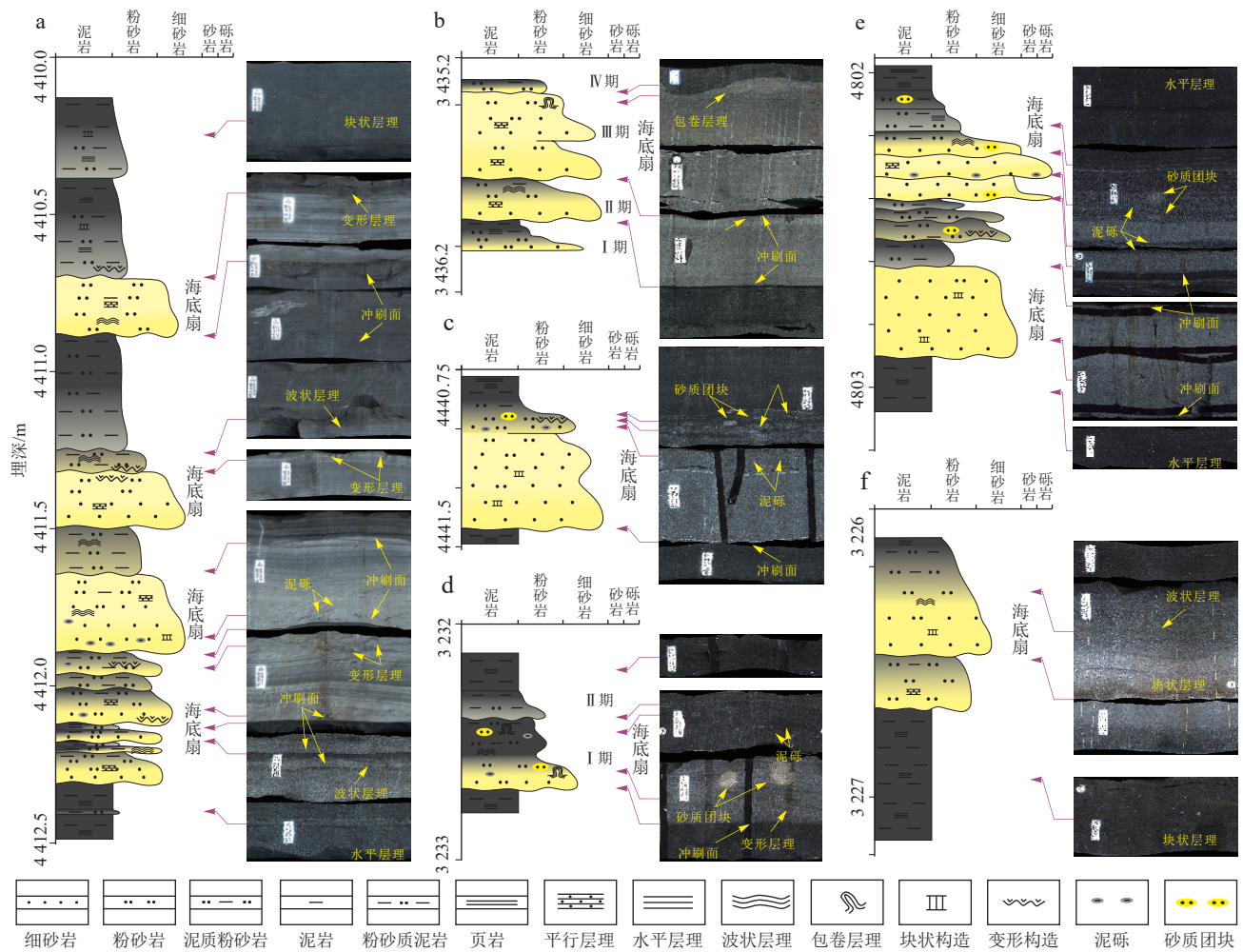


图4 川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇垂向岩性组合序列

Fig. 4 Vertical lithological assemblage sequences of submarine fans in the Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin.

a. 多期海底扇纵向叠置,垂向上水体变深,WY1井,埋深4 410.00~4 412.50 m;b. 4期海底扇纵向叠置,各期扇体突变接触,Z203井,埋深3 435.20~3 436.20 m;c. 单期海底扇,上覆陆棚泥岩渐变过渡,WY1井,埋深4 440.75~4 441.50 m;d. 2期海底扇纵向叠置,垂向上水体变深,W207井,埋深3 232.00~3 233.00 m;e. 多期海底扇纵向叠置,Z201井,埋深4 802.00~4 803.20 m;f. 2期纵向叠置,W207井,埋深3 226.00~3 227.20 m

反射特征,波谷集合体呈透镜状外形(图6a,a')。该类型地震反射在纵向上常发育于筇竹寺组一段内部,平面上多分布于德阳-安岳裂隙西侧,临近威远构造。

2.3.2 蠕虫状地震反射

蠕虫状反射相(类似于丘状或杂乱-亚平行反射构型)在研究区可进一步识别出2种亚类:①表现为复合波峰振幅内部以单个中频、弱连续续、中-弱波谷振幅反射为特征;②表现为“两峰夹一谷”,底部波峰通常为中-强振幅、强连续反射特征,顶部波峰则为中-弱振幅、较连续反射特征,波谷为中-强振幅、断续反射特征。蠕虫状地震反射整体具有“底平顶凸”结构(图6b,b')。该类型地震反射是研究区内最常见的反射类型,广泛发育于筇竹寺组各个沉积时期。

2.3.3 平行强地震反射

平行强地震反射主要表现为复合宽波谷中的中-低频、连续、中-强振幅反射(即亮点反射),或宽波谷顶、底出现的中-低频、断续反射特征(图6c,c')。该类型地震反射在纵向上多发育于筇竹寺组一段上部,平面上多分布于德阳-安岳裂隙内筇竹寺组的厚度高值区。

3 海底扇成因及空间分布

3.1 海底扇沉积类型

从过程沉积学的角度来看,海底扇的主导重力流类型、海底外部地貌特征及海洋动力条件共同控制了不同类型海底扇的沉积特征、平面形态及空间组合,对

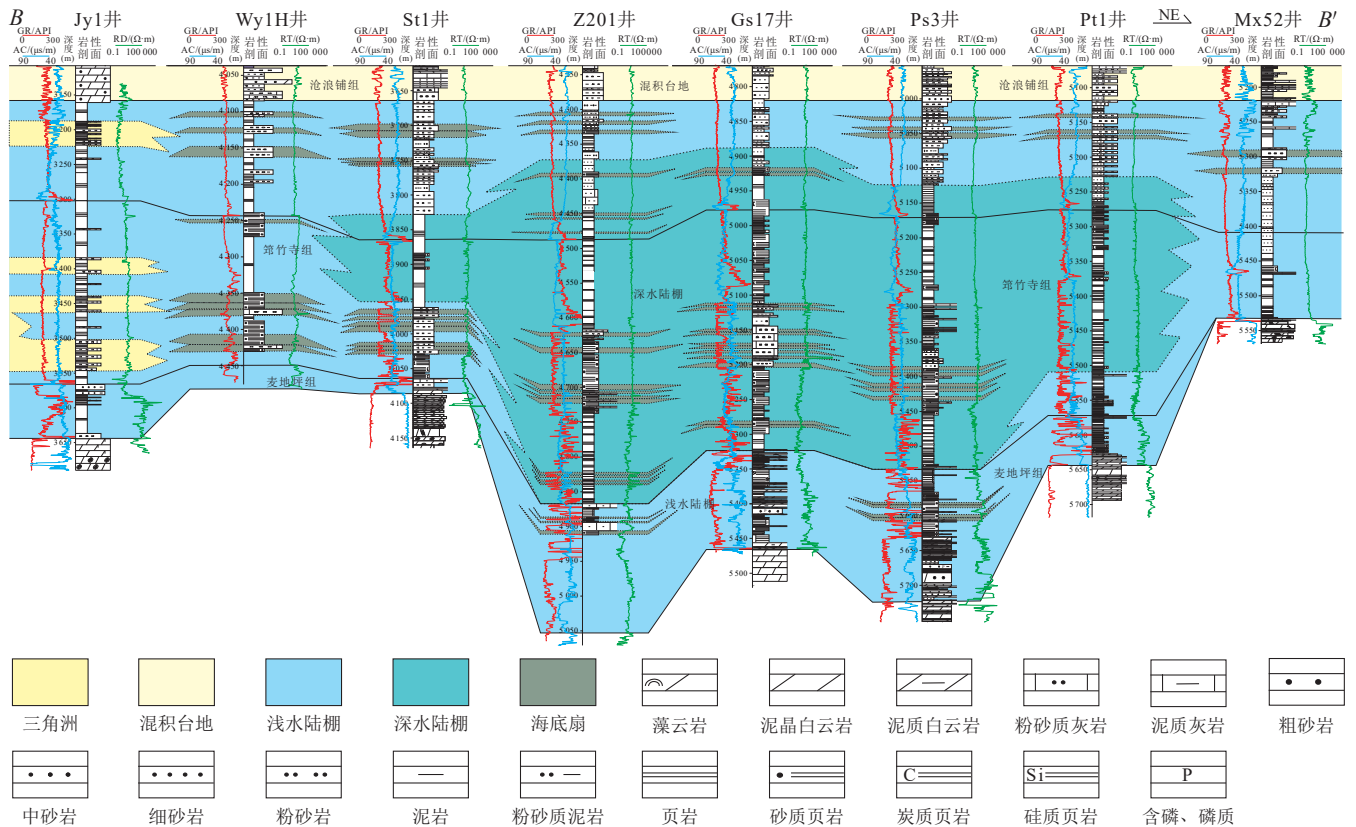


图5 川中地区下寒武统麦地坪组-筇竹寺组沉积相连井对比剖面(剖面位置见图1b)

Fig. 5 Cross-well sedimentary facies correlation section of the Lower Cambrian Maidiping Formation-Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin (see Fig. 1b for the section location)

系统认识海底扇的沉积作用具有重要的实际意义^[33-34]。本文基于岩相组合特征、地震反射特征及相关成因解释,将川中地区海底扇分为改造型、滑塌型和混合型3种主要重力流沉积类型(表1)。

3.1.1 改造型海底扇

改造型海底扇是指早期沉积于滨岸-浅水环境的碎屑物质,受潮汐、上升洋流或风暴等底流持续冲刷、再悬浮后,经短距离搬运并在深水区重新堆积的扇状沉积体(图7)。岩性以浅灰-灰白色砂岩、含砾粉-细砂岩、粉砂岩及泥质粉砂岩为主,偶见浅灰色粉砂岩、泥质粉砂岩砾石及不规则泥砾;整体发育粒序层理、块状层理及同沉积变形构造,可见完整的鲍马序列,常见多期不完整的鲍马序列垂向叠置(图3a,b;图4a,c)。改造型海底扇底多与浅水陆棚泥岩、前一期扇体砂岩及泥质粉砂岩段呈突变接触,顶部与陆棚灰黑色泥页岩渐变过渡。

岩心观察统计显示,改造型海底扇的单期厚度为0.5~3.0 m,钻井及测井揭示的累积厚度为6.0~12.0 m。GR曲线形态呈钟形、变形钟形或中-低值微

齿化特征,RT曲线形态呈中-低阻齿形特征(图5)。受持续稳定的洋流及潮汐作用影响,改造型海底扇体多期叠置发育,集合体规模相对较大。地震反射呈现透镜状地震相,内部具蠕虫状地震反射特征(图6a;图7a,b),而古坡折带底部是改造型海底扇体集中发育的部位(图7c,d)。单井及地震属性分析显示,改造型海底扇体多分布于威远—资中—简阳一线,主要受物源区及筇竹寺组沉积期古海底底型的控制,多沿古隆起之上发育的次级沟槽分布(图1b)。威远地区改造型海底扇体呈泥岩低振幅背景下的中-强振幅反射特征,平面呈不规则状,扇体内部缺乏明显的水道反射特征,面积超过150 km²(图8a,b)。

3.1.2 滑塌型海底扇

滑塌型海底扇沉积是由滑塌及风暴作用导致早期斜坡沉积物失稳,向斜坡底部或盆地深水区再调整的产物(图9a,b)。岩性以含(泥)砾粉-细砂岩和泥质粉砂岩为主,发育粒序层理、块状层理和平行层理等,多见鲍马序列下部A段和B段,富含深灰-灰黑色泥砾和泥岩撕裂屑,也可见浅灰色粉砂岩砾石(图2f-h;

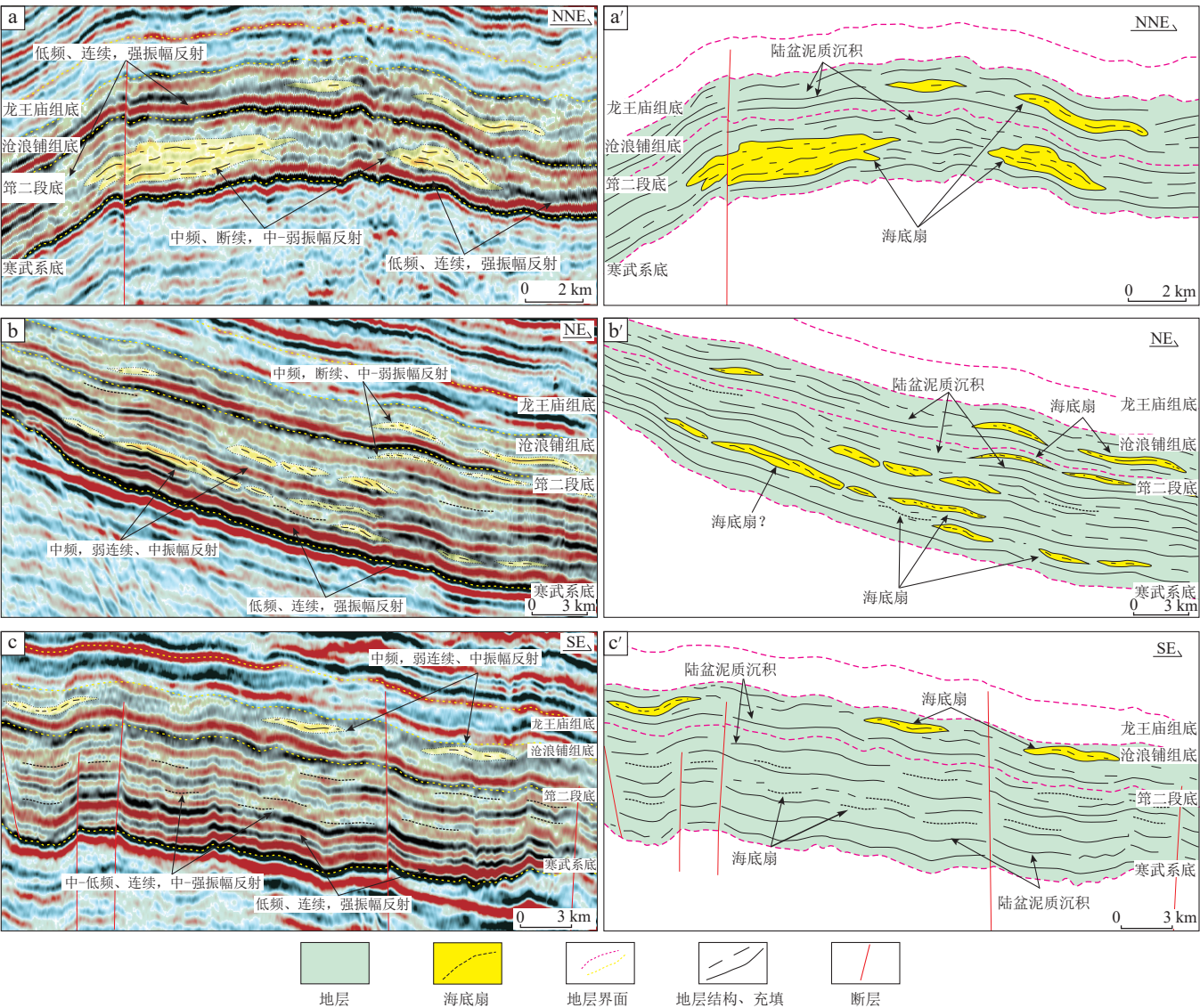


图6 川中地区下寒武统筇竹寺组地震反射结构类型(a,b,c)与沉积学解释剖面(a',b',c')

Fig. 6 Seismic reflection configuration types (a, b, c) and sedimentological interpretation section (a', b', c') of the Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin

a,a'. 透镜状地震反射结构;b,b'. 蠕虫状地震反射结构;c,c'. 平行强地震反射结构

表1 川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇成因类型划分

Table. 1 Genetic classification of submarine fans in the Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin

类型	岩石学特征	测井特征	地震反射特征	主控因素
改造型	砂岩、含砾粉-细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	GR曲线钟形、变形钟形或中-低值微齿化,RT曲线中-低阻齿形	内部呈蠕虫状地震反射,集体呈透镜状地震相	上升洋流、潮汐、风暴
滑塌型	(细)砂岩、含(泥)砾粉-细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	GR曲线中-低值齿化箱形,可见尖刀状,RT曲线中-低值齿形、微齿形,舌型,AC曲线低值微齿形	蠕虫状地震相、平行强反射地震相	潮汐、风暴
混合型	细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩	GR曲线指状低值或微齿化,RT曲线指状高电阻,AC曲线指状或尖刀状低值	低频-波峰、波谷反射中的强振幅反射,强平行反射地震相	等深流、重力流

图3h,i)。底部常见冲刷面,与下伏灰黑色陆棚泥页岩及早期海底扇砂岩呈突变接触;上部与陆棚泥岩呈渐变过渡,特别可见滑塌形成的碎屑流夹杂于浊流沉积内(图3i),反映了重力流搬运过程中的流体转换现象。

滑塌型海底扇多见于钻井取心段,单期扇体纵向厚度为1~6 m。对应的GR曲线呈中-低值微齿化箱形,可见尖刀状;RT曲线呈中-低值齿形、微齿形和舌型;AC曲线呈低值微齿形特征。滑塌型海底扇体纵

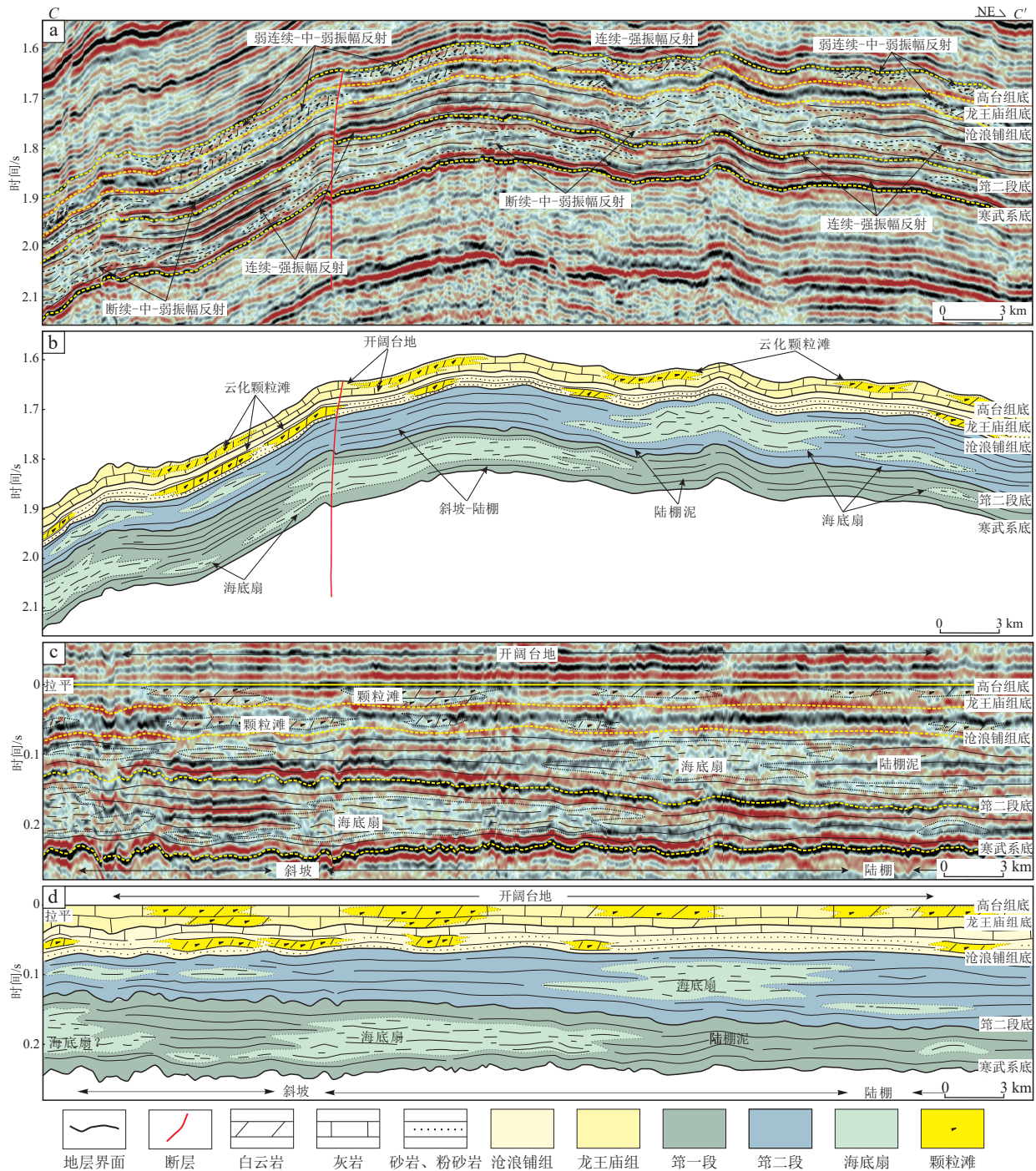


图7 川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇地震反射及地质解释剖面(剖面位置见图10)

Fig. 7 Seismic reflection and geological interpretation section of submarine fans in the Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin (see Fig. 10 for the section location)

a, b. 分别为威远地区麦地坪组—龙王庙组叠前时间域地震反射剖面及沉积学解释; c, d. 分别为威远地区麦地坪组—龙王庙组叠前时间域地震反射拉平剖面及沉积学解释

向规模介于其他两类海底扇体之间, 横向分布范围较小, 多分布于古地形坡折带底部, 被陆棚相泥岩包裹, 地震反射多呈蠕虫状地震相和平行强反射地震相(图8)。资201三维区的均方根振幅呈现泥岩弱反射背景下的局部中-强反射亮点, 推测主要为滑塌型海底扇(图8a, b)。

3.1.3 混合型海底扇

混合型海底扇主要是由浊流在浅水陆棚深水区及深水陆棚区受等深流等底流作用改造形成的沉积体(图9c, d)。岩性以(细)砂岩、(含泥)砾粉-细砂岩、粉砂岩、泥质粉砂岩为主, 可见磨圆程度较高的粉砂岩砾

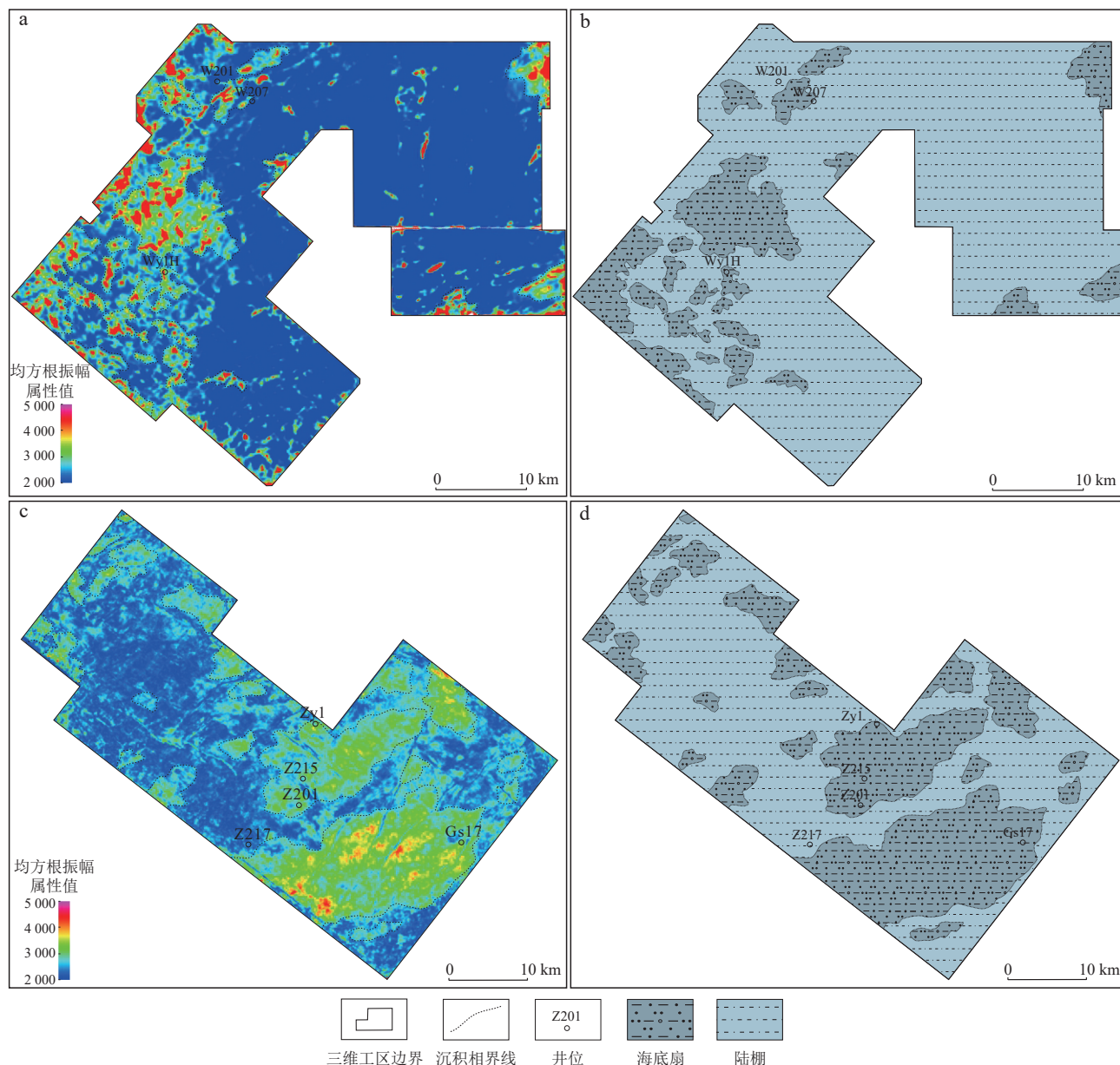


图8 川中地区重点三维工区下寒武统筇竹寺组地震属性及沉积相解释平面图(三维位置见图1b)

Fig. 8 Sedimentary facies map of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin

(see Fig. 1b for the location of the 3D seismic attribute slice)

a, b. 分别为威远三维工区第一²亚段均方根振幅属性及沉积相图; c, d. 分别为资201三维工区第一²亚段均方根振幅属性及沉积相图

石(图2a, c)。砂岩段发育波纹层理及爬升层理,或透镜状砂岩;底部可见冲刷面、泄水构造及包卷层理等同沉积构造或同沉积变形构造(图3d—g, j);上部与陆棚相暗色泥页岩呈渐变过渡(图4e, f)。

混合型海底扇纵向规模较小,但横向分布面积较大。岩心观察显示,单期混合型海底扇厚度为1~3 m,钻井和测井揭示的累积厚度为3~6 m。GR曲线呈低值指状或微齿化特征,RT曲线呈指状高电阻率特征,AC曲线呈指状或低值尖刀状特征。混合型海底扇垂向厚度小,受地震分辨率影响,其反射特征多隐匿于厚

层泥岩连续强平行地震反射内,表现为低频波峰和波谷反射中的强振幅反射,或强平行反射地震相(图6c, 图9)。资201三维区筇竹寺组海底扇的均方根振幅呈现中-弱振幅反射特征,局部可见中-强反射亮点,平面呈席状大面积分布(图8c, d)。

3.2 海底扇空间展布特征

传统认识中,海底扇多由浊流在海底峡谷出口处卸载形成,发育为具有海底水道-朵叶体单元的非限制性扇状沉积体^[35]。受触发机制、海底底型及海洋动

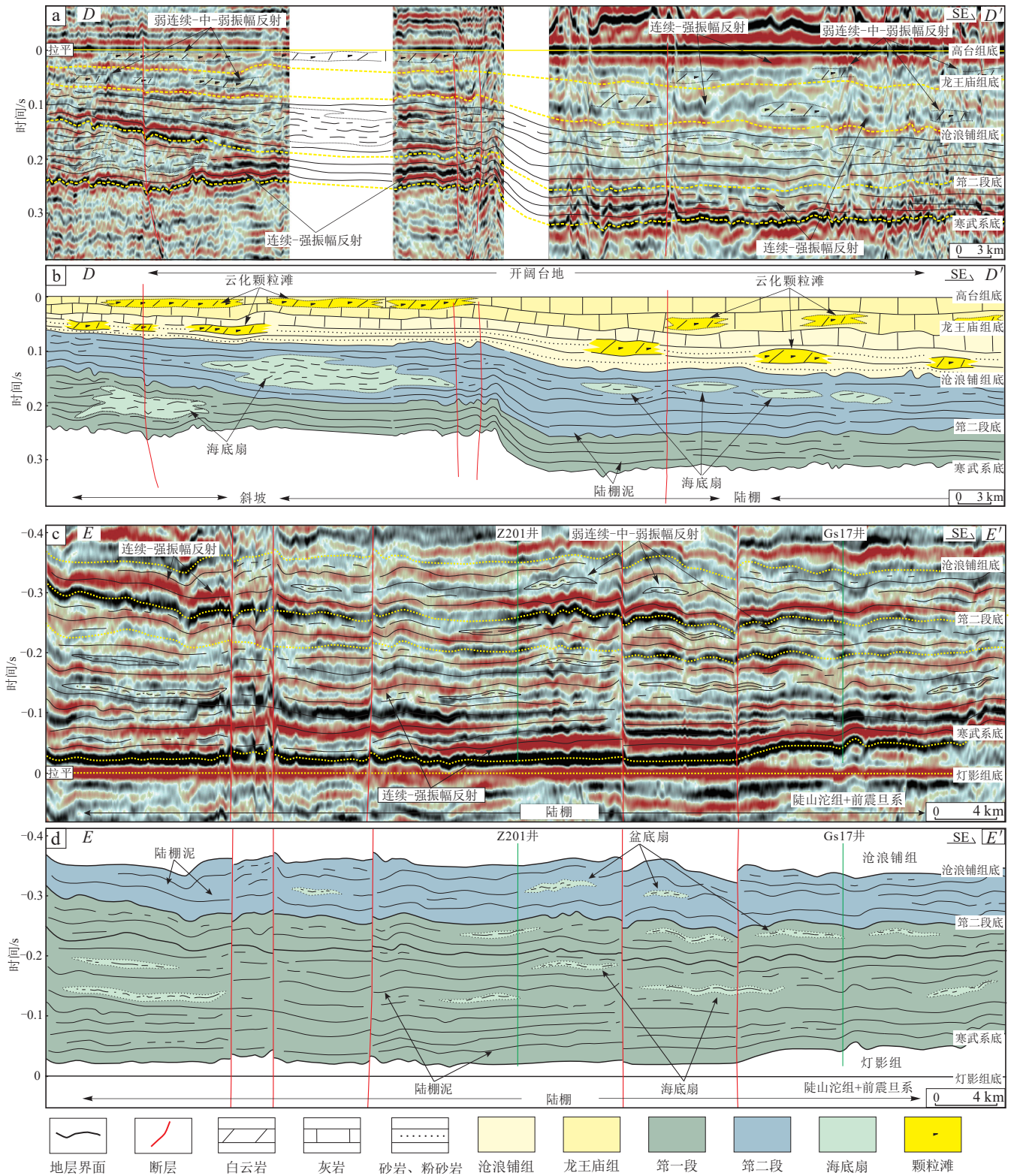


图9 四川盆地川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇地震反射及地质解释剖面(剖面位置见图10)

Fig. 9 Seismic reflection and geological interpretation section of submarine fans in the Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin (see Fig. 10 for the section location)

a, b. 分别为威远—自贡地区麦地坪组—龙王庙组叠前时间域地震反射拉平剖面及沉积学解释;c, d. 分别为资阳地区麦地坪组—龙王庙组叠前时间域地震反射拉平剖面及沉积学解释

力学背景等因素影响,川中地区筇竹寺组海底扇的类型、规模和空间展布呈现显著的规律性(图10)。

筇竹寺组沉积期,海底扇的物源主要来自于盆地西部康滇古陆周缘的潮坪沉积及其邻近分布的小型三

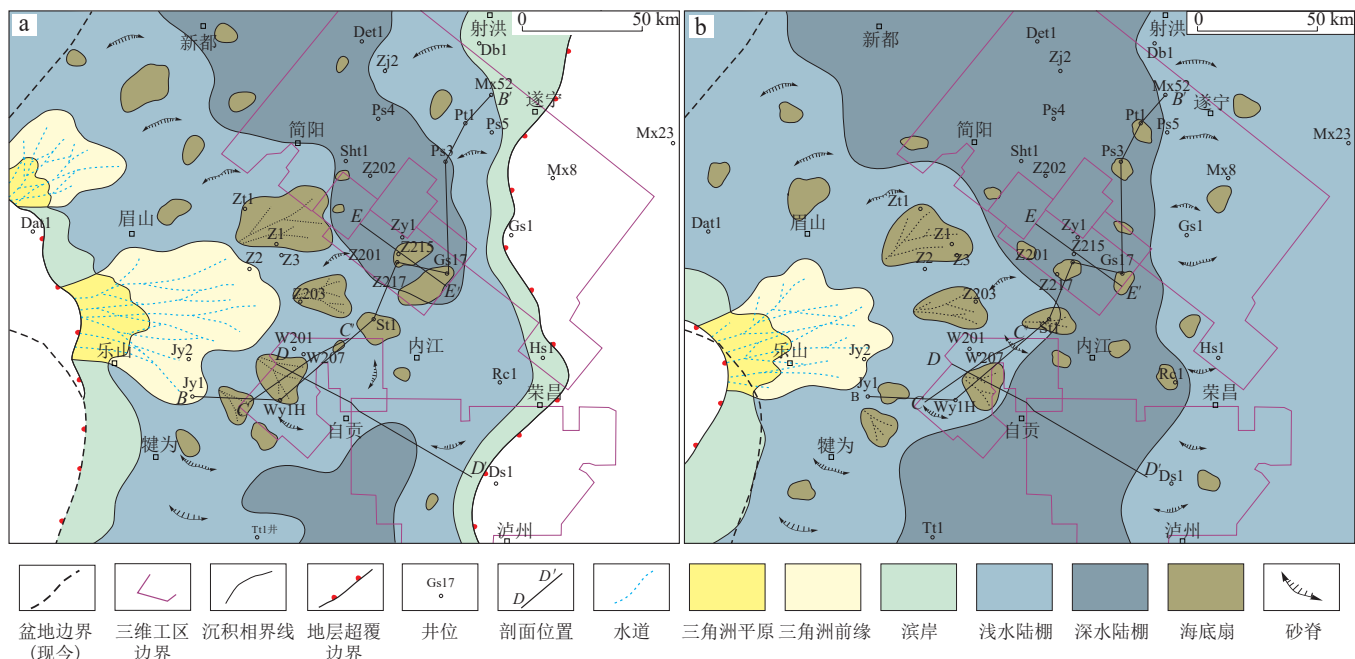


图10 川中地区下寒武统筇竹寺组沉积相平面图

Fig. 10 Sedimentary facies map of the Qiongzhusi Formation in the central Sichuan Basin.

a. 早期阶段(相当于第一¹亚段沉积期); b. 中期阶段(相当于第一²亚段沉积期)

角洲。受上升流及潮汐作用形成的改造型海底扇,主要分布于威远—资中—简阳一线的浅水陆棚坡折带底部(图1b,图10)。受持续性水动力作用的影响,改造型海底扇具有稳定的物源输入,多期重力流沉积垂向错落叠置,扇体规模大,平面呈不规则状,钻井岩-电特征、地震反射及地震属性特征显著(图7;图8a,b;图9a,b)。此外,筇竹寺组沉积期海平面具有快速升高、缓慢降低的变化趋势^[12,23,30],不同时期的改造型海底扇体具有向德阳—安岳裂陷内部明显进积的特征(图7;图9a,b)。混积型海底扇是由沿海底长距离搬运的浊流再受等深流进一步改造而形成的沉积体。该类型沉积具有单期厚度薄、平面分布范围大的特点(图8c,d;图9c,d),研究区内主要分布于自贡—荣昌—泸州及资中—简阳—新都一带的浅水陆棚深水区及深水陆棚区(图10)。滑塌型海底扇的分布介于改造型和混积型海底扇之间,主要分布于犍为一内江—简阳一线的浅水陆棚坡折带底部区域(图10)。基于源区、触发机制及平面展布特征,本研究建立了三角洲(滨岸)—海底扇、(滑塌型)海底扇和三角洲(滨岸)—(等深流改造)海底扇3种平面组合类型。综上所述,筇竹寺组沉积期的古海底底型决定了海底扇搬运路径、形态及分布,而物源与触发机制决定了海底扇的规模、岩性组合及砂体结构。

3.3 海底扇成因及沉积模式

3.3.1 海底扇触发机制

海底扇的潜在形成机制多样,主要包括海底沉积物失稳、洪水型异重流、海洋动力学机制及其复合触发机制等。大部分海底扇的形成由单一成因主导,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^[33-34,36]。岩性组合及岩心观察显示,川中地区筇竹寺组海底扇粒度偏细(图2—图5),缺乏陆源碎屑直接供源的粗碎屑颗粒,含泥砾;而页岩段则具有高脆性矿物含量(69.0%~76.5%)、高总有机碳含量(0.2%~3.1%)及强还原背景等特征^[1,17,23,26]。据此可判断,物源区风化剥蚀量低,对川中地区直接供源能力较弱,筇竹寺组海底扇体多为早期沉积物再改造堆积的产物。二维和三维地震反射特征及地震属性分析表明,浅水陆棚区的海底扇具有集中发育特征且扇体规模较大,海底扇集合体具有明显的透镜状及蠕虫状反射特征,而深水陆棚区扇体隐匿于连续宽波峰和波谷反射中,缺乏明显外形结构(图8,图9)。这些特征反映出海底扇(集合体)主要受持续性水流作用控制,并在古海底构造底型的限制下发育。前人研究结果表明,上升性洋流作用及热液活动是海域内营养物质的主要来源,也是造成上扬子地区古生产力差异的主要原因^[24,26,31]。据此认为,川中地区

筇竹寺组海底扇主要为海洋动力学机制成因,是上升洋流及沿岸流对滨岸沉积物持续改造、再堆积的产物。

3.3.2 重力流及等深流交互沉积

深海大洋中发育2种主要的地质营力:顺坡而下的重力流和沿坡流动的底流(包括等深流、深水潮汐底流、内波、内潮流等),相应形成重力流沉积体系和等深流沉积体系^[36-40]。相对于阵发性重力流而言,底流具有单向流动、长期稳定的特征。在底流活跃区,等深流可改造先存或正在沉积的重力流沉积,形成等深流-重力流混合沉积体系^[40-43]。然而,由于重力流与底流交互作用的复杂性和隐蔽性,相较于研究相对深入的重力流沉积体系或等深流沉积体系,针对重力流-等深流交互作用的典型沉积特征研究相对较少^[36,45]。前人研究认为,在不同时间尺度上,这种混合型深水沉积体系的沉积作用表现为3种形式:①在短期尺度上,海底扇的重力流水道与底流发生交互作用,表现为海底扇主水道的单向迁移特征,并形成底流型天然堤漂积体;②在中期尺度上,受侧向底流的持续改造,海底扇的朵叶体沿底流方向发生偏转,甚至局部改造为孤立的沙波或沙丘;③在长期尺度上,长期持续稳定的底流沉积作用形成丘状漂积体,阵发性重力流所形成的海底扇展布受到丘状地貌的限制,其水道亦表现出顺底流向侧向迁移的特征^[33,46]。

前人研究多集中于新生代以来被动大陆边缘的大型海底扇与等深流交互沉积^[35-42]。相比之下,川中地区筇竹寺组沉积期处于稳定克拉通边缘,在早寒武世早期快速海侵背景下,周缘古陆供源作用较弱,海底扇以相对细粒沉积为主(图2,图4)。基于钻井岩-电及地震反射特征,研究区重力流-等深流相互作用表现出以下宏观与微观特征:

宏观上,触发机制和古海底底型特征控制了海底扇的形态和展布特征。①浅水陆盆环境的海底扇在限制性古海底底型上展布,坡折带及次级沟槽是扇体主要的分散方向和叠加位置(图9c,d);②不同触发机制下的重力流-等深流相互作用强度差异性明显(图7;图9a,b);③以等深流作用为主的混合沉积作用形成的海底扇规模有限,缺乏明显的丘状建隆特征(部分原因可能受地震资料品质限制),泥岩背景下的强振幅是扇体的地震响应(图1b,c;图8)。

微观上,触发机制和流体搬运过程的差异导致砂体展布及沉积充填样式存在差异。①研究区海底扇多以浊流沉积为主导,发育鲍马序列(图2,图4);②以浊流为主的海底扇可见混合事件层发育(图3f);③以碎

屑流主导的海底扇发育频次和规模有限,可见碎屑流向浊流转化的特征(图3i);④以等深流为主导的海底扇中,来自重力流沉积物的(粉)砂岩粒度细、分选程度高,与陆棚泥岩呈薄互层产出,并与其他两类成因砂体在时-空分布上具有明显差异(图3e,j)。

研究区发育的波纹层理、爬升层理及透镜状砂岩(图3j),是底流(等深流)对先存浊积砂体进行筛选和再沉积的典型岩相标志,指示了重力流与等深流的交互作用。尽管研究区缺乏大规模的漂积体,但其频繁的薄互层特征代表了克拉通边缘特有的混合沉积响应。据此,本研究建立了川中地区下寒武统筇竹寺组重力流与等深流交互沉积模式(图11)。

3.3.3 筇竹寺组海底扇沉积模式

震旦系灯影组沉积后,受桐湾运动的影响,上扬子地区发生抬升,地层遭受剥蚀,形成了高低不平的古地貌(图1b)。受全球海平面快速上升的影响,早寒武世正是在这种高低起伏的古地貌基础上发生快速海侵,开始了梅树村组(麦地坪组)和筇竹寺组的沉积^[29,47]。

筇竹寺组沉积期,四川盆地主要发育周期性的潮坪-混积陆棚沉积,德阳-安岳裂陷内以深水陆棚相为主,裂陷外以浅水陆棚沉积相为主^[17-18,26,31,47]。川中地区位于裂陷中段,主要受盆地西南缘康滇古陆及盆地内等深流作用的影响,发育潮坪-三角洲-海底扇沉积体系(图12)。川西南地区筇竹寺组沉积期地形坡度较缓,且康滇古陆供源有限,缺乏大规模河流携带碎屑物质进入盆地内。受沿岸流及潮汐作用影响,盆地西缘以潮坪沉积为主,局部发育(潮控)三角洲沉积(图10,图11)。在上升洋流及风暴作用下,潮坪及三角洲沉积物被持续性水流改造,沿水下古底形斜坡再搬运、堆积,形成改造型海底扇沉积(图11)。受风暴浪及阵发性洪水作用形成的异重流,作为一种外源型持续性浊流,能够在海(湖)底保持长距离流动状态而不会快速消散,可将砂、砾及泥等沉积物持续向深水区搬运^[33,48-50]。此类海底扇单期规模小但分布面积大,并被陆棚泥页岩所包裹(图5;图9c,d;图11)。特别是处于深水区的扇体,受等深流作用影响逐渐明显,由沿大陆坡等深线流动的等深流及其携带的沉积物与处于其流向上的重力流沉积(物)混合沉积,形成混合型海底扇。

4 海底扇油气地质意义

深水海底扇不仅是重建古海洋与古构造演化的关键载体,其与优质烃源岩的共生关系更赋予了直接的

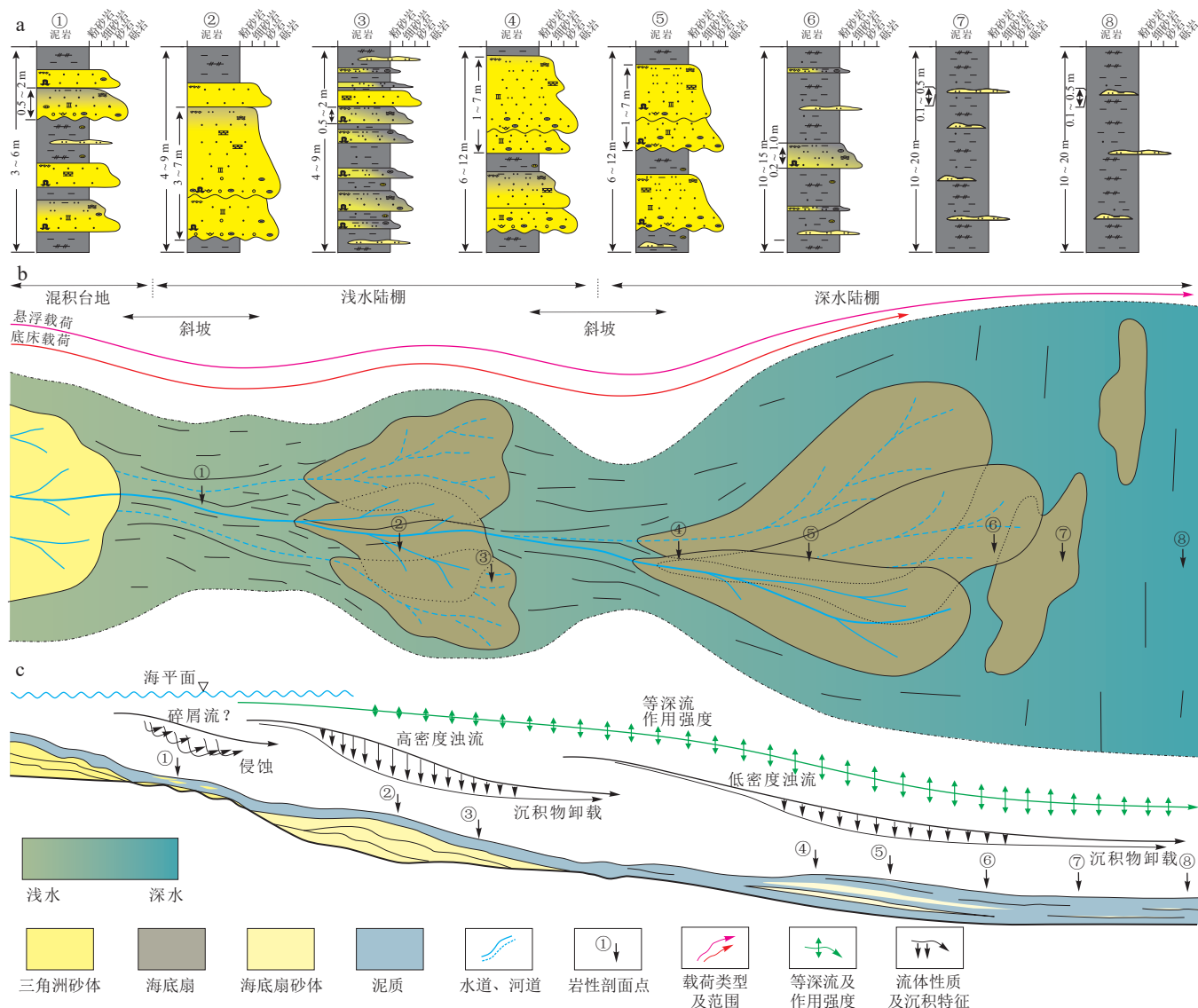


图 11 川中地区筇竹寺组重力流与等深流混积模式

Fig. 11 Conceptual model of mixed gravity-flow and contour-current deposition in the Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin.

a. 川中地区混积台地-浅水陆棚-深水陆棚环境典型沉积相岩性组合; b. 川中地区混积台地-浅水陆棚-深水陆棚环境荷载类型及沉积体平面分布特征; c. 川中地区混积台地-浅水陆棚-深水陆棚环境流体性质及沉积体剖面结构特征

油气地质意义。对川中地区筇竹寺组海底扇的深入解析,对于深化该层系页岩气及致密砂岩气勘探具有双重指示作用。海底扇体系为获取陆地的长期剥蚀历史提供了良好的研究载体。大型海底扇沉积物中保留了不同时间尺度的古气候记录,特别是海底扇的垂向叠置样式、粒度分布、朵叶体的侧向摆动与泥页岩之间的厚度关系等特征,与短期尺度的气候变化关系密切^[33,42,51-52]。中-长期尺度($10^4 \sim 10^6$ a)的气候变化(如温室-冰室气候转换、古季风强度变化)则直接影响了海底扇的主要供源体系及成因机制(如内源型和外源型重力流沉积作用)^[33,53]。对筇竹寺组内部各时期海底扇的进一步解剖,有助于分析震旦系末期一早寒武

世全球气候变化、海平面升降过程及古大陆的风化作用,进而明确生物大爆发时期环境-营养元素-生物之间相互关系。前人研究认为,在板块构造和盆地动力学尺度上,在该构造背景下发育的海底扇沉积反映了深海-半深海的沉积环境,是古洋盆发育的重要证据^[54-55],但对于川中地区上扬子克拉通边缘德阳-安岳裂陷的成因及演化,学术界尚存在多种观点,特别是对于桐湾Ⅲ幕是否存在及其对盆地构造-沉积分异作用的控制程度,研究中也存在较大争议^[19,56-60]。因此,对裂陷内海底扇的深入研究,可为德阳-安岳裂陷的性质、成因及演化提供新的认识,特别是为桐湾运动“第Ⅲ幕”的分析和厘定带来新的思路。

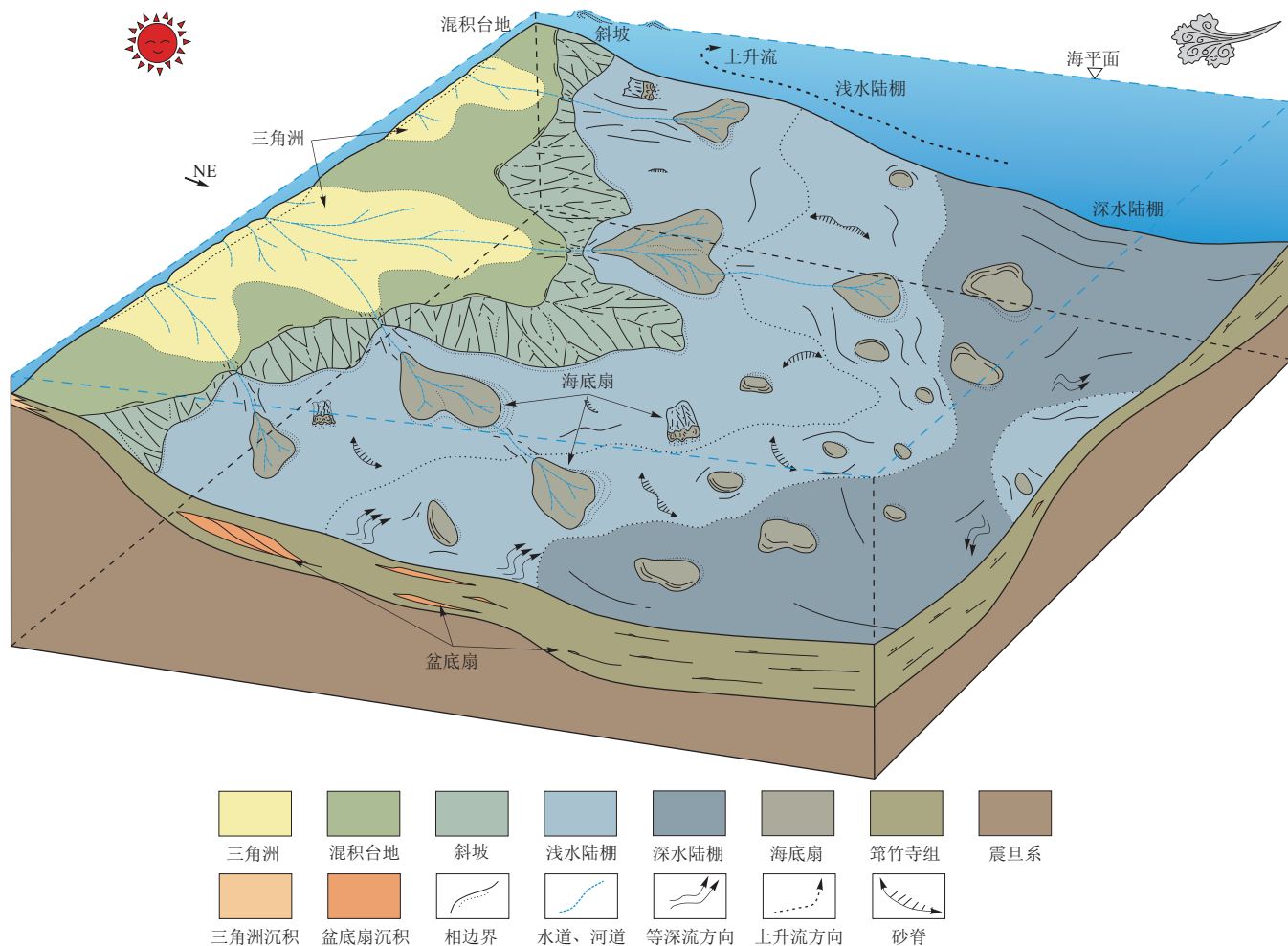


图12 川中地区下寒武统筇竹寺组海底扇发育及分布模式示意图

Fig. 12 Conceptual model of submarine-fan development and distribution in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, central Sichuan Basin.

深水重力流沉积形成了广泛分布的重力流砂岩,其中,深水水道是深海沉积物输送的主要途径。前人研究显示深水异重流沉积的底负载砂砾岩具有良好的物性(孔隙度可达25%以上),是良好的油气储层^[36,47,61-64]。陆相湖盆中重力流成因砂体类型多样、分布广泛,特别是处于深水区、被泥岩包裹的湖底扇体,往往因欠压实作用而形成异常高压、高孔渗储集体,具有良好的生-储-盖组合条件,是烃类流体运聚指向的低势能单元,已成为油气勘探的甜点区并取得了重大的探勘成果^[48,64-65]。与陆相湖盆相比,海相盆地具有明显的体量优势,无论是海底扇体还是烃源岩的发育规模,均远超陆相湖盆。特别是在等深流活动于一定时期内稳定发育的背景下,重力流海底扇体及其与等深流混合、改造沉积体(扇体),具有垂向上交错叠置、平面上大规模展布的特征。

目前,川中地区下寒武统页岩气勘探多集中于深水陆棚相页岩层段,Z201和W201等井测试获得高产工业气流^[1,16-17]。与泥页岩互层沉积的重力流及等深

流改造的海底扇体,具有良好的源-储组合条件。该类沉积体被厚层烃源岩包裹,处于浅埋藏压实、生排烃及干酪根裂解生气阶段,是水、油、气运聚的第一指向区,寒武系底扇体内部常发育超压,有利于砂岩原始孔隙的长期保持。Z201等井的勘探结果证实,筇竹寺组现今仍发育超压,压力系数大于2.0,显示出典型的强超压特征^[22,66],这种超压体系有利于砂岩原生孔隙的保存。川中地区寒武系埋深普遍介于3 000~6 000 m(图1a),且筇竹寺组烃源岩处于干酪根裂解生气阶段。对重力流及受等深流改造的海底扇进行勘探,不仅可以深化对页岩中(粉)砂岩甜点夹层的探索、提升勘探成功率,还可进一步拓展海相致密砂岩天然气勘探的新领域。此外,钻井及测井成果显示,筇竹寺组垂向上由多个大型海侵—海退旋回组成,每个旋回中的砂泥岩组合具有明显差异性。不同区带的重力流发育类型可能存在差异,且其与等深流的混积作用亦有明显不同,从而具有不同的油气地质意义。因此本文认为,对于重力流海底扇成因类型的分析,以及在细分等时地

层格架下准确预测规模储集砂体的空间展布,能够进一步拓展页岩气(及海相致密砂岩气)的勘探领域,并有助于提升页岩气测试及开发效果。

5 结论

1) 四川盆地下寒武统筇竹寺组发育深水重力流沉积,依据成因将川中地区海底扇分为改造型、滑塌型、混合型3种主要沉积类型。基于重力流海底扇的物质来源及分散特征,建立了三角洲(滨岸)-海底扇、(滑塌)海底扇和三角洲(滨岸)-(等深流改造)海底扇3种沉积组合类型。

2) 寒武系筇竹寺组海底扇受控于快速海侵背景下的浊流沉积,其触发机制可能主要与上升洋流及沿岸流作用有关。海底扇的结构、空间分布及规模主要受控于重力流海底扇的成因机制及盆地古底型结构。依据物源、触发机制及分布特征建立了海底扇-等深流交互沉积模型及海底扇空间分布模式。

3) 川中地区发育的原始堆积及等深流改造型海底扇,被优质烃源岩包裹,构成了优越的生-储-盖组合。其埋藏适中、压力系数高,是海相页岩气勘探的甜点区,也是四川盆地筇竹寺组增储上产最现实的领域。

致谢:感谢审稿人的宝贵建议使本文增色良多。感谢本刊编辑专业细致的指导。本文部分图件清绘由成都理工大学能源学院敬元朴完成。本次研究得到中国石油天然气股份有限公司重大科技专项(编号:2023ZZ16YJ01)和国家自然科学基金(编号:U2344209)的资助。

参 考 文 献

- [1] 何骁,郑马嘉,刘勇,等. 四川盆地“槽-隆”控制下的寒武系筇竹寺组页岩储层特征及其差异性成因[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 420-439.
HE Xiao, ZHENG Majia, LIU Yong, et al. Reservoir characteristics and differential genesis of the Cambrian Qiongzhusi Formation shale under the control of “trough-ridge” in the Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 420-439.
- [2] 郭旭升,胡东风,李宇平,等. 涪陵页岩气田富集高产主控地质因素[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 481-491.
GUO Xusheng, HU Dongfeng, LI Yuping, et al. Geological factors controlling the enrichment and high yield of Fuling shale gas field [J]. Petroleum Exploration and Development, 2017, 44(4): 481-491.
- [3] 马新华,谢军,雍锐,等. 四川盆地南部龙马溪组页岩气储集层地质特征及高产控制因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 841-855.
MA Xinhua, XIE Jun, YONG Rui, et al. Geological characteristics and controlling factors of high productivity in the Longmaxi Formation shale gas reservoirs, southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(5): 841-855.
- [4] 邹才能,董大忠,熊伟,等. 中国页岩气新区带、新层系和新类型勘探进展、挑战及对策[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(2): 309-326.
ZOU Caineng, DONG DaZhong, XIONG Wei, et al. Advances, challenges, and countermeasures in shale gas exploration of underexplored plays, sequences and new types in China [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(2): 309-326.
- [5] 黄金亮,邹才能,李建忠,等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.
HUANG Jinliang, ZOU Caineng, LI Jianzhong, et al. Formation conditions and resource potential of shale gas in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the southern Sichuan Basin [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75.
- [6] 梁狄刚,郭彤楼,陈建平,等. 中国南方海相生烃成藏研究的若干新进展(一)南方四套区域性海相烃源岩的分布[J]. 海相油气地质, 2008, 13(2): 1-16.
LIANG Digang, GUO Tonglou, CHEN Jianping, et al. New advances in the study of marine hydrocarbon generation and accumulation in South China (I) Distribution of four sets of regional marine source rocks [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2008, 13(2): 1-16.
- [7] 李延钧,赵圣贤,黄勇斌,等. 四川盆地南部下寒武统筇竹寺组页岩沉积微相研究[J]. 地质学报, 2013, 87(8): 1136-1148.
LI Yanjun, ZHAO Shengxian, HUANG Yongbin, et al. Study on sedimentary microfacies of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the southern Sichuan Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(8): 1136-1148.
- [8] 谢武仁,姜华,马石玉,等. 四川盆地德阳-安岳裂陷晚震旦世-早寒武世沉积演化特征与有利勘探方向[J]. 天然气地球科学, 2022, 33(8): 1240-1250.
XIE Wuren, JIANG Hua, MA Shiyu, et al. Sedimentary evolution characteristics and favorable exploration direction of the Deyang-Anyue rift from Late Sinian to Early Cambrian, Sichuan Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2022, 33(8): 1240-1250.
- [9] 刘瑞崑,周文,徐浩,等. 层序格架下构造-沉积分异对页岩气储层特征的控制-以四川盆地西南部筇竹寺组为例[J]. 沉积学报, 2023, 41(5): 1478-1494.
LIU Ruiyan, ZHOU Wen, XU Hao, et al. Control of tectonic-sedimentary differentiation on shale gas reservoir characteristics in sequence framework: A case study of Qiongzhusi Formation in southwestern Sichuan Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1478-1494.
- [10] 孟宪武,田景春,张翔,等. 川西南井研地区筇竹寺组页岩气特征[J]. 矿物岩石, 2014, 34(2): 96-105.
MENG Xianwu, TIAN Jingchun, ZHANG Xiang, et al. Characteristics of shale gas of Qiongzhusi Formation in Jingyan area, southwestern Sichuan [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2014, 34(2): 96-105.
- [11] 赵文智,李建忠,杨涛,等. 中国南方海相页岩气成藏差异性比较与意义[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(4): 499-510.

- ZHAO Wenzhi, LI Jianzhong, YANG Tao, et al. Comparison and significance of marine shale gas accumulation in South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43 (4): 499-510.
- [12] 范海经,邓虎成,伏美燕,等. 四川盆地寒武统筇竹寺组沉积特征及其对构造的响应[J]. *沉积学报*, 2021, 9(4): 1004-1019.
- FAN Haijing, DENG Hucheng, FU Meiyan, et al. Sedimentary characteristics of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its response to tectonics [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021, 39(4): 1004-1019.
- [13] 金之钧,郑和荣,蔡立国,等. 中国前中生代海相烃源岩发育的构造-沉积条件[J]. *沉积学报*, 2010, 28(5): 875-883.
- JIN Zhijun, ZHENG Herong, CAI Liguang, et al. Tectonic-Sedimentary conditions for the formation of Pre-Mesozoic marine source rocks in China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28 (5): 875-883.
- [14] 牟传龙,周恩恩,梁薇,等. 中上扬子地区早古生代烃源岩沉积环境与油气勘探[J]. *地质学报*, 2011, 85(4): 526-532.
- MU Chuanlong, ZHOU Kenken, LIANG Wei, et al. Sedimentary environment and petroleum exploration of Early Paleozoic source rocks in the Middle-Upper Yangtze Region [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(4): 526-532.
- [15] 贾智彬,侯杰杰,孙德强,等. 贵州地区下寒武统牛蹄塘组烃源岩热水沉积成因鉴别与强度评价[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(3): 429-437.
- JIA Zhibin, HOU Dujie, SUN Deqiang, et al. Identification and intensity evaluation of hydrothermal sedimentation of the Lower Cambrian Niutitang Formation source rocks in Guizhou area [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(3): 429-437.
- [16] 翟光明. 中国石油地质志 第二版 卷十三: 四川油气区(中国石油)[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022.
- ZHAI Guangming Ed.). *China Petroleum Geology (2nd ed., Vol. 13: Sichuan Oil and Gas Region)* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [17] 雍锐,吴建发,吴伟,等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气勘探发现及其意义[J]. *石油学报*, 2024, 45(9): 1309-1323.
- YONG Rui, WU Jianfa, WU Wei, et al. Discovery and significance of shale gas exploration in the Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2024, 45 (9): 1309-1323.
- [18] 雍锐,石学文,罗超,等. 四川盆地寒武系筇竹寺组页岩气“槽-隆富集”规律及勘探实践[J]. *石油勘探与开发*, 2024, 51(6): 1-16.
- YONG Rui, SHI Xuewen, LUO Chao, et al. “Trough-ridge enrichment” pattern and exploration practice of shale gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2024, 51(6): 1-16.
- [19] 文龙,罗冰,钟原,等. 四川盆地灯影期沉积特征及槽-台体系成因模式[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 48(5): 514-524.
- WEN Long, LUO Bing, ZHONG Yuan, et al. Sedimentary characteristics and genetic model of trough-platform system during Dengying period in Sichuan Basin [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2021, 48(5): 514-524.
- [20] 汪泽成,姜华,陈志勇,等. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 884-897.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, CHEN Zhiyong, et al. Late Sinian tectonic paleogeography and its petroleum geological significance in Middle-Upper Yangtze region [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 884-897.
- [21] 杨学锋,张成林,赵圣贤,等. 川南地区筇竹寺组页岩气藏特征及勘探启示[J]. *天然气地球科学*, 2025, 36(1): 13-24.
- YANG Xuefeng, ZHANG Chenglin, ZHAO Shengxian, et al. Characteristics of shale gas reservoirs in the Qiongzhusi Formation, southern Sichuan Basin, and its exploration implications [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2025, 36(1): 13-24.
- [22] 何骁,梁峰,李海,等. 四川盆地寒武统筇竹寺组海相页岩气高产井突破与富集模式[J]. *中国石油勘探*, 2024b, 29(1): 142-145.
- HE Xiao, LIANG Feng, LI Hai, et al. Breakthrough of high-yield wells and enrichment model of marine shale gas in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2024, 29(1): 142-145.
- [23] 杨一茗,石学文,刘文平,等. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积演化模式与有利相带优选[J]. *天然气地球科学*, 2024, 35(12): 2106-2120.
- YANG Yiming, SHI Xuewen, LIU Wenping, et al. Sedimentary evolution model and favorable facies belt optimization of the Qiongzhusi Formation in the middle part of the Deyang-Anyue rift, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2024, 35 (12): 2106-2120.
- [24] 夏威,于炳松,王运海,等. 四川盆地德阳-安岳裂陷槽中段筇竹寺组沉积演化模式与有利相带优选[J]. *矿物岩石*, 2019, 37(3): 77-89.
- XIA Wei, YU Bingsong, WANG Yunhai, et al. Sedimentary evolution model and favorable facies belt optimization of the Qiongzhusi Formation in the middle part of the Deyang-Anyue rift, Sichuan Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2019, 37 (3): 77-89.
- [25] 王玉满,沈均均,邱振,等. 中上扬子地区下寒武统筇竹寺组结核体发育特征及沉积环境意义[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(9): 1308-1323.
- WANG Yuman, SHEN Junjun, QIU Zhen, et al. Development characteristics of concretions in the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, Middle-Upper Yangtze region and its implications for sedimentary environment [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32 (9): 1308-1323.
- [26] 赵建华,金之钧,林畅松,等. 上扬子地区下寒武统筇竹寺组页岩沉积环境[J]. *石油与天然气地质*, 2019, 40(4): 701-715.
- ZHAO Jianhua, JIN Zhijun, LIN Changsong, et al. Sedimentary environment of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation shale in the Upper Yangtze region [J]. *Oil & Gas Geology*, 2019, 40(4): 701-715.
- [27] 熊亮,邓虎成,吴冬,等. 四川盆地及其周缘下寒武统筇竹寺组细粒沉积特征与影响因素[J]. *石油实验地质*, 2023, 45(5): 857-871.
- XIONG Liang, DENG Hucheng, WU Dong, et al. Fine-grained sedimentary characteristics and influencing factors of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in the Sichuan Basin and its

- periphery [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2023, 45(5): 857-871.
- [28] 余宽宏,金振奎,苏奎,等. 中、上扬子地台北缘寒武纪沉积特征及油气勘探意义[J]. *中国科学:地球科学*, 2013, 43(9): 1418-1435.
- YU Kuanhong, JIN Zhenkui, SU Kui, et al. Cambrian sedimentary characteristics and their petroleum exploration significance on the northern margin of the Middle-Upper Yangtze Block [J]. *Science China Earth Sciences*, 2013, 43(9): 1418-1435.
- [29] 何登发,李英强,黄涵宇,等. 四川多旋回叠合盆地的形成演化与油气聚集[M]. 北京: 科学出版社, 2020: 1-569.
- HE Dengfa, LI Yingqiang, HUANG HanYu, et al. Formation, Evolution and Hydrocarbon Accumulation of the Polycyclic Superimposed Sichuan Basin, China [M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [30] 吴冬,邓虎成,熊亮,等. 四川盆地及其周缘下寒武统麦地坪组-筇竹寺组层序充填和演化模式[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(3): 764-777.
- WU Dong, DENG Hucheng, XIONG Liang, et al. Sequence filling and evolution model of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations in the Sichuan Basin and its periphery [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(3): 764-777.
- [31] 陈威振,田景春,林小兵,等. 川西南下寒武统麦地坪组-筇竹寺组元素地球化学特征及其古环境意义-以JS1井为例[J]. *沉积学报*, 2024, 42(5): 1784-1798.
- CHEN Weizhen, TIAN Jingchun, LIN Xiaobing, et al. Elemental geochemical characteristics and paleoenvironmental implications of the Lower Cambrian Maidiping-Qiongzhusi formations in southwestern Sichuan: A case study of well JS1 [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024, 42(5): 1784-1798.
- [32] 谷志东,殷积峰,姜华,等. 四川盆地宣汉-开江古隆起的发现及意义[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(6): 893-904.
- GU Zhidong, YIN Jifeng, JIANG Hua, et al. Discovery and significance of the Xuanhan-Kaijiang paleo-uplift in the Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(6): 893-904.
- [33] 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. Submarine fan facies models, sedimentary processes, and implications for sedimentary records [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(2): 435-449.
- [34] 袁静,赵广昊,景安语,等. 埕岛-桩海地区断陷湖盆不同触发机制深水重力流成因扇体沉积特征及其差异[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(1): 1-13.
- YUAN Jing, ZHAO Guanghao, JING Anyu, et al. Sedimentary characteristics and differences of deep-water gravity flow fans with different triggering mechanisms in continental faulted basin in Chengdao-Zhuanghai area [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(1): 1-13.
- [35] Walker R G. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for stratigraphic traps: REPLY [J]. *AAPG Bulletin*, 1978, 63(5): 811.
- [36] 龚承林,徐长贵,尤丽,等. 深海重力流与底流交互作用的沉积响应及其勘探意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2024, 43(4): 721-733.
- GONG Chenglin, XU Changgui, YOU Li, et al. Sedimentary responses to the interaction between deep-water gravity flows and bottom currents and their implications for hydrocarbon exploration [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2024, 43(4): 721-733.
- [37] Shanmugam G. Chapter 5 deep-water bottom currents and their deposits [M]. *Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier, 2008: 59-81.
- [38] Rebesco M, Hernández-Molina F J, Van Rooij D, Wählin A. 2014. Contourites and associated sediments controlled by deep-water circulation processes: State-of-the-art and future considerations [J]. *Marine Geology*, 352: 111-154.
- [39] Fonnese M, Palermo D, Galbiati M, et al. A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: The giant Eocene Coral Field in northern Mozambique [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 179-201.
- [40] 李华,何明薇,邱春光,等. 深水等深流与重力流交互作用沉积(2000-2022年)研究进展[J]. *沉积学报*, 2023, 41(1): 18-36.
- LI Hua, HE Mingwei, QIU Chunguang, et al. Research advances (2000-2022) in the deposits formed by interactions between deep-water contour currents and gravity flows [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2023, 41(1): 18-36.
- [41] Faugères J C, Imbert P, Mézerais M L, et al. Seismic patterns of a muddy contourite fan (Vema Channel, South Brazilian Basin) and a sandy distal turbidite deep-sea fan (Cap Ferret system, Bay of Biscay): A comparison [J]. *Sedimentary Geology*, 1998, 115(1/2/3/4): 81-110.
- [42] Gong C L, Wang Y M, Rebesco M, et al. How do turbidity flows interact with contour currents in unidirectionally migrating deepwater channels [J]. *Geology*, 2018, 46(6): 551-554.
- [43] Fonnese M, Palermo D, Galbiati M, et al. A new world-class deep-water play-type, deposited by the syndepositional interaction of turbidity flows and bottom currents: The giant Eocene Coral Field in northern Mozambique [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2020, 111: 179-201.
- [44] Macquaker J H S, Taylor K G, Gawthorpe R L. High-resolution Facies analyses of mudstones: Implications for Paleoenvironmental and sequence stratigraphic interpretations of offshore ancient mud-dominated successions [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2007, 77(4): 324-339.
- [45] Fuhrmann A, Kane I A, Clare M A, et al. Hybrid turbidite drift channel complexes: An integrated multiscale model [J]. *Geology*, 2020, 48(6): 562-568.
- [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] 郭彤楼,邓虎成,赵爽,等. 四川盆地寒武系筇竹寺组新类型页岩气形成机理与勘探突破[J]. *石油勘探与开发*, 2025, 52(1): 1-13.

- GUO Tonglou, DENG Hucheng, ZHAO Shuang, et al. Formation mechanism and exploration breakthrough of a new type of shale gas in the Cambrian Qiongzhusi Formation, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2025, 52(1): 1–13.
- [48] 谈明轩,朱筱敏,朱世发. 异重流沉积过程和沉积特征研究[J]. *高校地质学报*, 2015, 21(1): 94–104.
- TAN Mingxuan, ZHU Xiaomin, ZHU Shifa. Sedimentary processes and characteristics of hyperpycnal flow deposits [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2015, 21(1): 94–104.
- [49] 杨田,操应长,田景春,等. 陆相湖盆深水重力流混合事件层沉积及沉积学意义[J]. *地质学报*, 2021, 95(12): 3842–3857.
- YANG Tian, CAO Yingchang, TIAN Jingchun, et al. Sedimentology and implications of the deep-lacustrine gravity-flow mixed event layers in continental rift basins [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(12): 3842–3857.
- [50] Piper D J W, Normark W R. 2001. Sandy fans-from Amazon to Hueneme and beyond [J]. *AAPG Bulletin*, 85 (8): 1407–1438.
- [51] Bouma A H. Fine-grained submarine fans as possible recorders of long- and short-term climatic changes [J]. *Global and Planetary Change*, 2001, 28(1/2/3/4): 85–91.
- [52] Li Y, Clift P D, Boning P, et al. Continuous Holocene input of river sediment to the Indus Submarine Canyon [J]. *Marine Geology*, 2018, 406: 159–176.
- [53] Zavala C, Arcuri M. Intrabasinal and extrabasinal turbidites: Origin and distinctive characteristics [J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 337: 36–54.
- [54] Hsieh Y H, Liu C S, Suppe J, et al. The chimei submarine canyon and fan: A record of Taiwan arc-continent collision on the rapidly deforming overriding plate [J]. *Tectonics*, 2020, 39 (11): e2020TC006148.
- [55] Garzanti E, Bayon G, Dennielou B, et al. The Congo deep-sea fan: Mineralogical, REE, and Nd-isotope variability in quartzose passive-margin sand [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2021, 91 (5): 433–450.
- [56] 刘树根,孙玮,罗志立,等. 兴凯地裂运动与四川盆地地下组合油气勘探[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 40(05): 511–520.
- LIU Shugen, SUN Wei, LUO Zhili, et al. Xingkai taphrogenesis and petroleum exploration from lower assemblage in Sichuan Basin, China [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2013, 40(5): 511–520.
- [57] 汪泽成,姜华,王铜山,等. 上扬子地区新元古界含油气系统与油气勘探潜力[J]. *天然气工业*, 2014, 34(04): 27–36.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Neoproterozoic petroleum system and hydrocarbon exploration potential in the Upper Yangtze region [J]. *Natural Gas Industry*, 2014, 34(4): 27–36.
- [58] 段金宝,梅庆华,李毕松,等. 四川盆地震旦纪–早寒武世构造–沉积演化过程[J]. *地球科学*, 2019, 44(03): 738–755.
- DUAN Jinbao, MEI Qinghua, LI Bisong, et al. Tectonic-sedimentary evolution from Sinian to Early Cambrian in Sichuan Basin [J]. *Earth Science*, 2019, 44(3): 738–755.
- [59] 刘静江,刘慧荣,李文皓,等. 四川盆地裂陷槽研究新进展–关于裂陷槽成因机制与形成时间的探讨[J]. *地质论评*, 2021, 67 (03): 767–786.
- LIU Jingjiang, LIU Huirong, LI Wenhao, et al. New research progress of the rift trough in Sichuan Basin: Discussion on genetic mechanism and formation time of the rift trough [J]. *Geological Review*, 2021, 67(3): 767–786.
- [60] 周刚,罗冰,张新,等. 四川盆地德阳–安岳凹槽形成机理及灯影组沉积新格局[J]. *天然气工业*, 2024, 44(08): 13–28.
- ZHOU Gang, LUO Bing, ZHANG Xin, et al. Formation mechanism of the Deyang-Anyue Trough and a new sedimentary pattern of the Dengying Formation in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2024, 44(8): 13–28.
- [61] Mayall M, Jones E, Casey M. Turbidite channel reservoirs key elements in facies prediction and effective development [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2006, 23 (8): 821–841.
- [62] 耿军阳,鲜本忠,刘振献,等. 余志云深水重力流沉积模拟研究进展与展望[J]. *沉积学报*, 2025, 43(03): 827–845.
- GENG Junyang, XIAN Benzong, LIU Zhenxian, et al. Advances and prospects in flume-tank simulation of deep-water gravity flow deposition [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2025, 43(3): 827–845.
- [63] 张自力,李琦,朱筱敏,等. 陆相断陷湖盆重力流湖底扇沉积与地震响应特征分析–以渤海湾盆地霸县凹陷古近系沙河街组为例[J]. *古地理学报*, 2023, 25(5): 1049–1068.
- ZHANG Zili, LI Qi, ZHU Xiaomin, et al. Sub-lacustrine fan deposits of gravity flows and characteristics of seismic response in continental rift lake basin: A case study of the Paleogene Shahejie Formation in Baxian Sag, Bohai Bay Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2023, 25(5): 1049–1068.
- [64] 陈华,邓秉文,吴高奎,等. 下刚果–刚果扇盆地A区块中新统盐构造活动背景下深水重力流沉积特征[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2025, 49(3): 63–72.
- CHEN Hua, DENG Bingwen, WU Gaokui, et al. Characteristics of deep-water gravity-flow deposits under the background of salt tectonic activities of the Miocene in Block A of the Lower Congo-Congo Fan Basin [J]. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*, 2025, 49(3): 63–72.
- [65] 王冠民,庞小军,黄晓波,等. 渤海海域辽中凹陷南部古近系东营组三段重力流砂岩[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(1): 81–95.
- Wang Guanmin, Pang Xiaojun, Huang Xiaobo, et al. Characteristics and origin of high-quality gravity-flow sandstone reservoirs in the 3rd member of the Dongying Formation, southern Liao zhong Sag, Bohai Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45 (1): 81–95.
- [66] 李彦佑,吴娟,周志鹏,等. 四川盆地德阳–安岳裂陷槽中段寒武系筇竹寺组页岩气差异富集过程——来自裂缝脉体与流体包裹体的证据[J]. *石油实验地质*, 2025, 47(5): 988–1002.
- LI Yanyou, WU Juan, ZHOU Zhipeng, et al. Differential enrichment process of shale gas in Cambrian Qiongzhusi Formation in middle section of Deyang-Anyue rift trough, Sichuan Basin: Evidence from fracture veins and fluid inclusions [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2025, 47(5): 988–1002.

(编辑 张玉银)