

川中古隆起北斜坡下寒武统沧浪铺组一段混合沉积特征及模式

龙虹宇¹, 张亚¹, 和源¹, 周刚¹, 李勇¹, 李成龙¹, 陈迪¹, 陈曦¹,
钟梓月², 杨西燕², 范存辉²

(1. 中国石油西南油气田分公司 勘探开发研究院, 四川 成都 610051; 2. 西南石油大学 地球科学与技术学院, 四川 成都 610500)

摘要:川中古隆起北斜坡下寒武统沧浪铺组发育混合沉积。根据典型钻井岩心、岩屑薄片观察和测井资料, 分析下寒武统沧浪铺组一段(沧一段)岩石学特征、沉积环境和成岩作用, 探讨混合沉积类型及特征, 刻画混积岩的空间分布, 揭示研究区混合沉积的主控因素及沉积模式。结果表明: 研究区下寒武统沧一段微观上表现为陆源碎屑组分与碳酸盐组分频繁互层或相互杂糅, 形成具有混合沉积特征的混积岩; 宏观上发育混积岩层系、碎屑岩—混积岩层系、碎屑岩—碳酸盐岩层系及碳酸盐岩—混积岩层系, 不同混积层系组合成复合式 I 型、II 型及渐变式等混合沉积类型。沧一段混合沉积主要受海平面升降变化、构造运动及风暴作用影响, 还受微生物及古杯生物黏结捕获陆源碎屑物质影响。与龙王庙组混合沉积相比, 沧一段陆源石英颗粒的体积分数、粒径和混积强度大, 混积类型丰富, 混积层系多, 有利储层发育于弱混积颗粒滩或无陆源碎屑物质混入的颗粒滩。该结果为四川盆地沧浪铺组下一步的油气勘探和开发提供依据。

关键词:混积岩; 混积层系; 混合沉积类型; 沉积特征; 沉积模式; 沧浪铺组; 寒武统; 川中古隆起

中图分类号: TE122.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-4107(2025)02-0019-11

0 引言

海相碳酸盐岩储层是油气资源勘探研究领域的关键储层, 在全球油气勘探中占重要地位^[1], 颗粒滩碳酸盐岩储层是重点勘探对象^[2], 其中二叠系长兴组和寒武系龙王庙组颗粒滩等储层具有重大勘探突破。2020 年, 作为海相颗粒滩碳酸盐岩储层发育的沧浪铺组, 在川中北斜坡 JT1 井测试日产天然气 $51.62 \times 10^5 \text{ m}^3$ ^[3]。人们研究四川盆地沧浪铺组的层序、沉积相及储层特性, 认为沧浪铺组可识别地层叠置转换面和岩性岩相转换面 2 种层序界面类型, 将沧浪铺组划分为 2 个 II 型三级层序(SQ1 和 SQ2), 每个三级层序内部发育并保存海侵体系域(TST)和高位体系域(HST), 呈缓慢海侵、快速海退的特点^[4]。刘仿韩等^[5]分析米仓山南坡沧浪铺组沉积相, 认为沧浪铺组一段(沧一段)沉积期主要为滨海—潮坪环境, 沧浪铺组二段(沧二段)沉积期主要为碎屑岩沉积环境。王振宇等^[6]认为, 沧一段发育开阔台地相、局限台地相及混积潮坪相等沉积相。沧一段孔隙类型主要为粒内溶孔, 其次为粒间溶孔, 有利的碳酸盐组分及后续的成岩—构造作用影响孔隙的发育和演化, 形成由亮晶鲕粒白云岩→含砂鲕粒白云岩→砂质鲕粒白云岩→细粒岩屑砂岩→石灰岩类孔隙面孔率依次降低的岩性排序特征^[7]。四川盆地沧浪铺组实钻井结果显示, 沧浪铺组未达到工业油气流开采条件, 原因是川中地区沧一段岩性发育典型的碳酸盐岩与碎屑岩混合沉积, 导致储层难以形成有利储集空间。

渤海油田在混合沉积油气勘探开发上取得重大突破, 混合沉积储层是渤海油田油气增储上产的重要领域, 具有勘探开发前景^[8]。有关川中地区沧浪铺组混合沉积的研究少, 曾楷等^[9]认为, 川北地区沧浪铺组是以碳酸盐为主的混积体系, 具有“近源”沉积的特点。受沿岸流和波浪作用影响, 陆源碎屑物质通过三角洲—河流入海口进入浅海, 影响台地边缘相带的微生物丘、古杯丘和鲕粒滩的形成, 进而形成相缘渐变混合和原地沉积混合, 风暴^[10-11]、浊流等间断性事件对混积体系起主要作用, 易形成事件突变混合^[12-14]。

收稿日期: 2024-06-26; 编辑: 朱秀杰

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科研项目(2023ZZ16YJ01)

作者简介: 龙虹宇(1991—), 女, 硕士, 工程师, 主要从事石油天然气地质综合方面的研究。

根据川中北斜坡下寒武统沧浪铺组典型钻井岩心、岩屑薄片观察和测井资料,分析陆源碎屑物质及碳酸盐物质体积分数和发育特征等,探讨研究区下寒武统沧一段混合沉积类型和特征,明确混合沉积主控因素及沉积模式,为研究区混合沉积类型储层的勘探开发提供参考。

1 区域地质概况

四川盆地是上扬子板块的大型多旋回盆地,其形成与受交叉深大断裂影响的上扬子克拉通密切相关,属于菱形构造盆地^[15]。研究区位于四川盆地中部、川中古隆中斜平缓构造带的乐山—龙女寺古隆起北部(见图1(a)),构造变形较弱,整体为一单斜构造^[16],主要研究区域为北斜坡蓬莱气区^[16]。多期桐湾运动奠定沧浪铺组沉积前的沉积格局^[17-18],沧浪铺组实现继承性发展,四川盆地整体为西高东低的古地貌特征。早寒武世,地质环境整体呈海退趋势,海水主要从东南方向侵入,水体加深。德阳—安岳裂陷槽在前期构造运动中形成并逐步完善,进入补偿沉积阶段^[18],源自西部和北部的物源开始对裂陷槽进行填平补齐^[19]。沧浪铺组沉积时期,古地貌的沉积格局由原来的隆凹相间转变为西部相对较高、东部相对较低的缓坡沉积^[20]。沧浪铺组在北斜坡存在陆源碎屑物质与碳酸盐物质混积现象,研究区多口钻井的岩心及薄片可见混积岩发育。

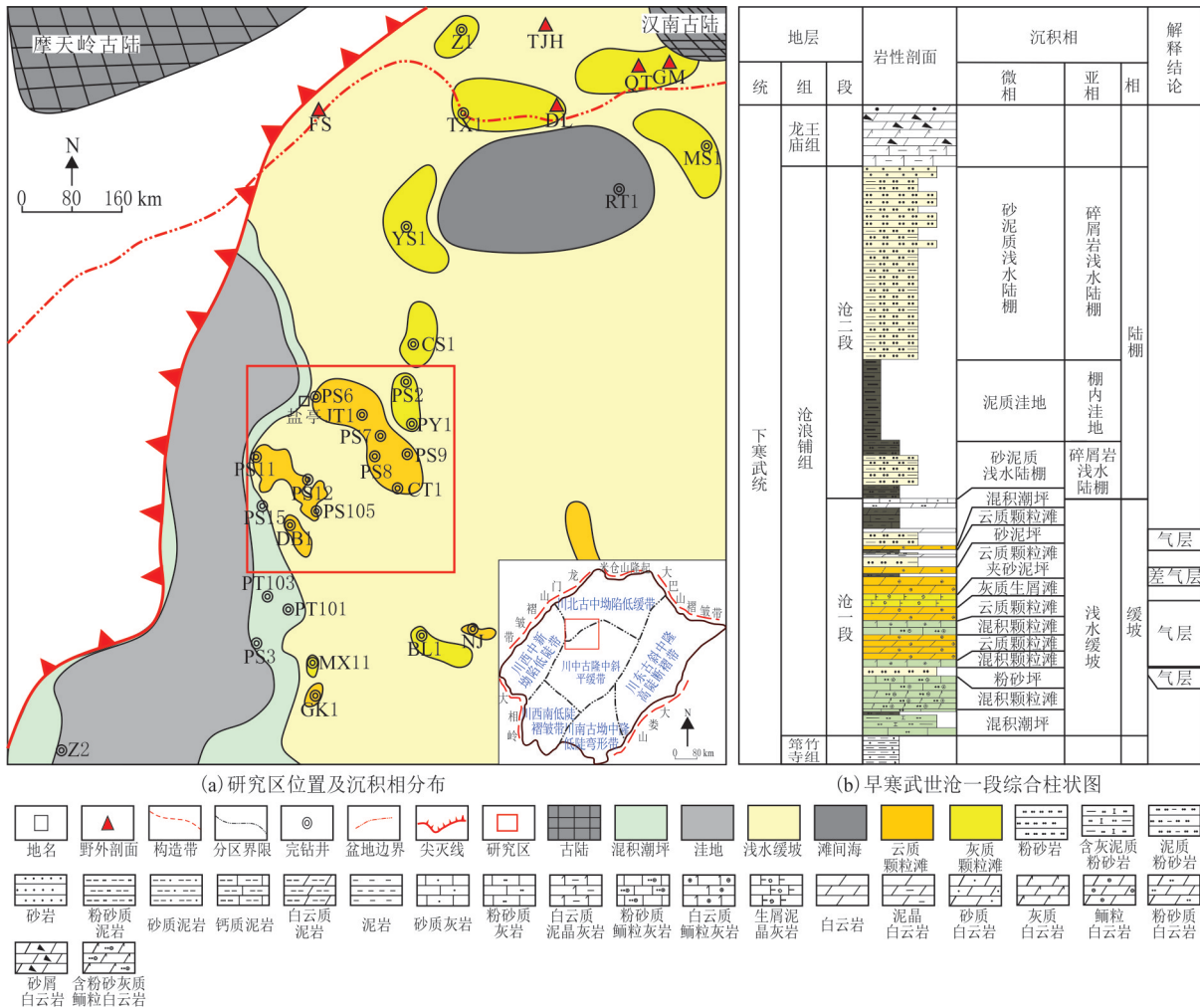


图1 研究区位置、沉积相分布及早寒武世沧一段地层综合柱状图(据文献[16]修改)

Fig.1 Location of the study area, sedimentary facies distribution and stratigraphic composite columnar of the first member of Canglangpu Formation in Early Cambrian(modified by reference[16])

加里东运动末期,四川盆地西部至中部古隆起抬升剥蚀,形成沧浪铺组侵蚀窗^[21],研究区下寒武统在靠近侵蚀窗附近地层缺失,其余地区保存完整,且地层横向分布稳定,自下而上发育筇竹寺组、沧浪铺组和

龙王庙组。研究区沧浪铺组自下而上可分为沧一段和沧二段。沧一段以碳酸盐岩发育为主,含碎屑岩与碳酸盐岩互层的混合沉积;沧二段主要发育砂泥岩等碎屑岩沉积(见图1(b))。

2 混积岩类型及特征

根据混积岩宏观和微观形态、碳酸盐物质和陆源碎屑物质体积分数差异,郭福生等^[22]提出狭义混合沉积和广义混合沉积的分类方法,认为狭义混合沉积主要指混积岩形成于同一岩层,存在陆源碎屑成分和碳酸盐成分的混合,广义混合沉积是指陆源碎屑岩、碳酸盐岩和混积岩以互层或夹层形式出现的混积层系;董桂玉等^[23]对混积岩进行分类,将混积岩划分为陆源碎屑质—碳酸盐混积岩、含陆源碎屑—碳酸盐岩混积岩、碳酸盐质—陆源碎屑混积岩及含碳酸盐—陆源碎屑混积岩4类。

由川中北斜坡沧一段钻井岩心、岩屑薄片观察可知,研究区沧一段发育大量混积岩,且类型多样(见图2),主要有(含灰质)钙质粉砂质泥岩、含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩、含粉砂质颗粒白云岩、条带状粉砂质白云岩、含白云质粉砂岩条带状泥岩、含泥岩条带状钙质砂岩和含泥砾砂质白云岩等,其中占比较大的是(含灰质)钙质粉砂质泥岩、含粉砂质颗粒白云岩、条带状粉砂质白云岩和含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩等。

(1)含灰质)钙质粉砂质泥岩。以泥岩夹(混积)粉砂岩纹层为主,呈深灰—灰黑色。石英体积分数为15%~30%,颗粒分选较好,磨圆度较差,多呈次棱角状。含灰质碳酸盐矿物组分,体积分数为12%~27%。

(2)含粉砂质颗粒白云岩。多为浅灰色—灰色,其中石英体积分数超过5%,主要分布于颗粒周围或鲕粒核心。颗粒多为鲕粒或生屑、砂屑,以鲕粒为主,鲕粒直径多为400~600 μm,体积分数为30%~60%。鲕粒类型多为圆状或椭圆状的同心鲕,局部可见放射鲕、复鲕等。鲕粒极易受溶蚀作用影响而形成溶孔(溶洞),后期大多被陆源碎屑物质或方解石、白云石、沥青充填。在沉积古地貌高地,含粉砂质颗粒灰岩易遭受强烈云化,形成含粉砂质颗粒白云岩(见图3(f))。

(3)条带状粉砂质白云岩。以深灰色粉砂质条带和浅灰色白云岩等厚互层为主。石英体积分数为10%~30%,颗粒分选较好,多呈棱角状。岩心可见黄铁矿集合体,镜下可见大量沥青充填于裂缝或孔隙(见图3(g))。

(4)含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩。以灰—深灰色为主,混积的鲕粒白云岩夹泥质条带,岩心可见水平纹层。石英体积分数为10%~30%,颗粒分选较差,呈次棱角状—次圆状。鲕粒白云岩具有混积特征,含灰质碳酸盐矿物组分和陆源碎屑组分(见图3(h-i))。

研究区沧一段混积岩的陆源碎屑物质体积分数相对较低(<50%),普遍在5%~40%之间(见图2)。陆源碎屑成分主要为石英,粒径为0.03~0.15 mm,分选整体较好,磨圆度差—中等。沧一段陆源碎屑物质主要有4种混合赋存方式:晶粒白云岩、含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩中可见陆源碎屑颗粒充填于缝合线内部及其周围(见图3(a-b));晶粒白云岩或砂质白云岩中可见陆源碎屑颗粒呈斑点状散布于白云岩基质(见图3(c)),也可见陆源碎屑条带与白云岩基质形成纹层相互叠置;残余砂屑或鲕粒白云岩中可见陆源碎屑颗粒充填在鲕粒颗粒间(见图3(d-e))或鲕粒颗粒核心中(见图3(f))。

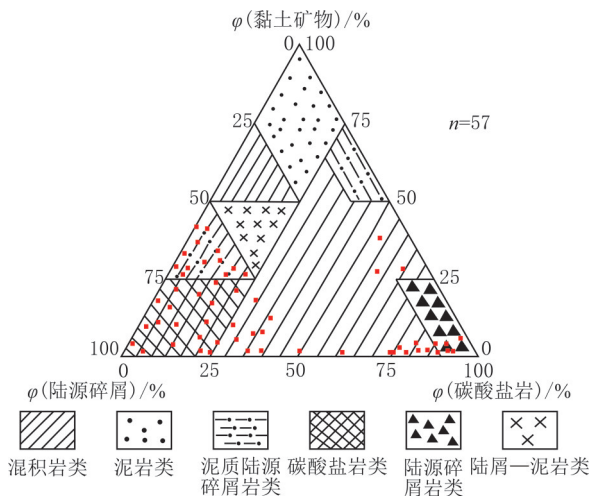
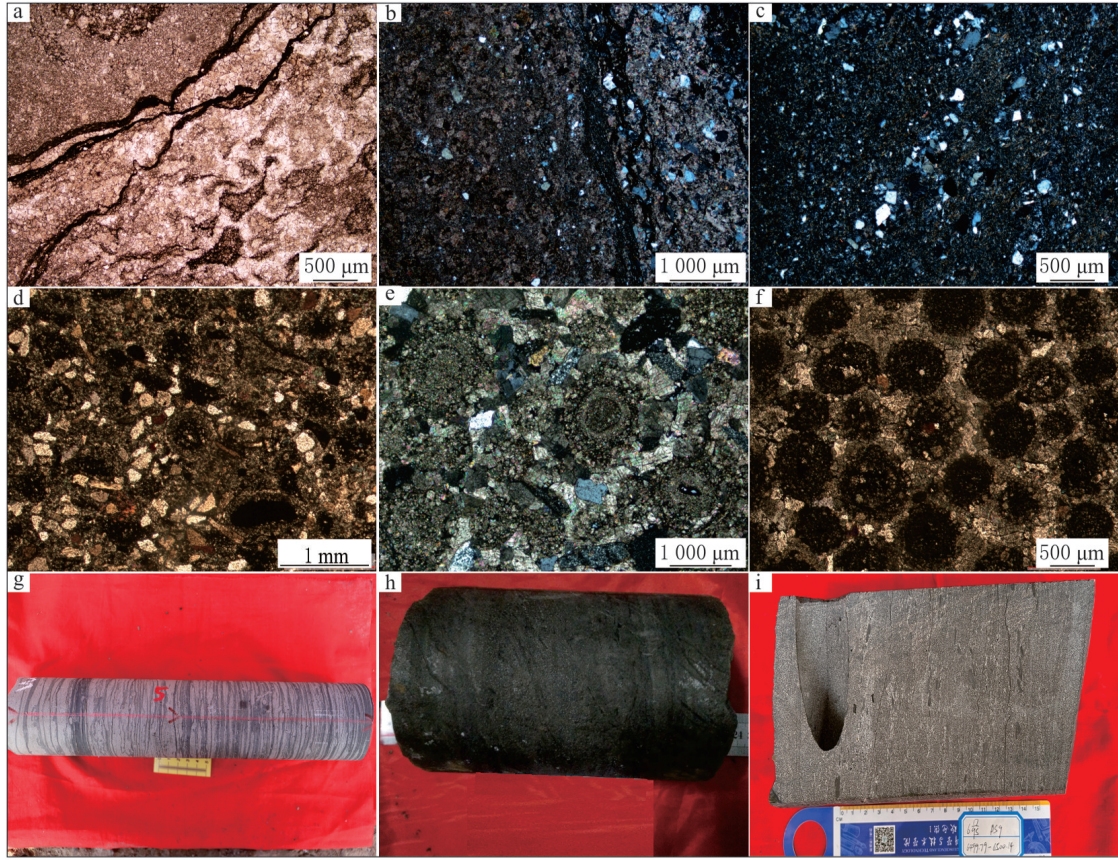


图2 研究区沧一段混积岩组分三端元图

Fig. 2 Three-terminal element diagram of the composition of mixed deposits in the first member of Canglangpu Formation in the study area



(a) 残余砾屑白云岩, PS1井, 6 782.41 m; (b) 含粉砂质鲕粒白云岩, 陆源碎屑颗粒充填于缝合线内部及周围, PS11井, 6 922.39 m; (c) 含粉砂质泥晶白云岩, 陆源碎屑颗粒呈斑点状散布于基质, PS11井, 6 924.63 m; (d) 含粉砂质鲕粒灰岩, 陆源碎屑颗粒分布在鲕粒颗粒间, CT1井, 6 269.02 m; (e) 粉砂质鲕粒白云岩, 陆源碎屑颗粒充填于鲕粒, DB1井, 5 936.57 m; (f) 含粉砂质鲕粒云岩, 陆源碎屑颗粒分布于鲕粒核心, CT1井, 6 263.89 m; (g) 条带状粉砂质白云岩, PY1井, 6 875.51~6 875.83 m; (h) 含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩, PS1井, 6 775.45~6 775.60 m; (i) 含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩, PS9井, 6 499.79~6 500.14 m

图 3 研究区沧一段混积岩类型

Fig. 3 Rock types of mixed deposits in the first member of Canglangpu Formation in the study area

3 混积层系划分

根据文献[22-23]和研究区混积岩发育特征,研究区沧一段可分为混积岩层系、碎屑岩—混积岩层系、碎屑岩—碳酸盐岩层系和碳酸盐岩—混积岩层系 4 种类型。

3.1 混积岩层系

研究区混积岩层系可分为以碎屑岩为主的混积岩、均匀混积岩和以碳酸盐岩为主的混积岩。

(1)以碎屑岩为主的混积岩。主要包括两类:一类为泥岩夹(混积)粉—细砂岩或泥岩夹(混积)碳酸盐岩纹层(条带状),以含钙质粉砂条带状泥岩为主,代表沉积水动力强弱交互出现、以弱水动力为主的沉积环境;另一类为混积粉—细砂岩夹(混积)泥岩或(混积)碳酸盐岩,主要为含泥质条带状细砂岩,以强水动力沉积环境为主(见图 4(a))。

(2)均匀混积岩。主要表现为等厚互层的条带状(纹层)的泥岩或泥质碳酸盐岩,以及条带状(纹层)混积粉—细砂岩或混积碳酸盐岩,代表沉积水动力强弱交互出现的沉积环境,主要以条带状粉砂质白云岩、条带状泥岩与条带状含灰白云质粉砂岩互层为主(见图 4(b))。

(3)以碳酸盐岩为主的混积岩。主要包括两类:一类以(混积颗粒)碳酸盐岩夹(混积、粉砂质)泥岩条带或泥—微晶碳酸盐岩条带为主,岩心上可见夹泥粉晶白云岩条带含白云砂质鲕粒灰岩,代表沉积水动力强弱交互出现、以较强水动力为主的沉积环境;另一类为(混积颗粒)碳酸盐岩夹亮晶颗粒碳酸盐岩条带,

岩心上可见夹亮晶鲕粒白云岩条带含砂细晶白云岩,以强水动力沉积环境为主(见图4(c))。

3.2 碎屑岩—混积岩层系

碎屑岩岩性以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩为主;混积岩以碳酸盐岩为主,主要为含粉砂质鲕粒白云岩和含泥质生屑灰岩等(见图4(d、f、h-i)),其中石英体积分数为5%~35%。混积特征为碎屑岩与混积岩呈夹层互层出现。镜下可见碎屑岩中陆源碎屑磨圆度低,陆源碎屑经风暴作用进行搬运,随后在风暴平息期沉积而形成粉砂质泥岩。风暴平息期的陆源碎屑物质输入减少,形成“半清水”环境,在局部构造高部位沉积水动力较强,形成含粉砂质鲕粒灰岩,或经白云石化作用而形成粉砂质鲕粒白云岩等;在局部构造低部位,沉积水动力不强,沉积粉砂质泥晶灰岩。

3.3 碎屑岩—碳酸盐岩层系

碎屑岩岩性以粉砂质泥岩、泥质粉砂岩和泥岩为主。碳酸盐岩类型为细晶白云岩、泥晶白云岩、白云质鲕粒灰岩和灰质鲕粒白云岩等。该类层系在研究区中较为少见,岩心可见粉砂质泥岩或泥岩与细晶白云岩、鲕粒白云岩、鲕粒灰岩等呈互层状或夹层状产出。陆源碎屑物质在碎屑岩中体积分数较高,在碳酸盐岩中较少或不发育(见图4(g))。

3.4 碳酸盐岩—混积岩层系

碳酸盐岩类型为白云质鲕粒灰岩、灰质鲕粒白云岩等(见图4(e))。混积岩类型包括粉砂质鲕粒白云岩、粉砂质鲕粒灰岩和含泥质生屑灰岩等。混积岩中的陆源碎屑颗粒占比为5%~20%,粒径为0.02~0.20 mm,混积岩大多为不同岩性的夹层或互层。



(a) 含白云质粉砂岩条带泥岩, PS2井, 7 274.20 m; (b) 条带状泥岩—含灰白云质粉砂岩, CT1井, 6 282.66~6 282.89 m; (c) 含泥质条带含砂灰质亮晶鲕粒白云岩, PS7井, 6 775.73~6 775.89 m; (d) 粉砂质泥岩与含砂质鲕粒白云岩互层, PS9井, 6 501.38~6 501.60 m; (e) 细粉晶白云岩—泥晶白云岩—含砂质鲕粒白云岩, PS9井, 6 510.34~6 510.51 m; (f) 含粉砂质灰质鲕粒白云岩—灰质粉砂质泥岩, CT1井, 6 287.30~6 287.45 m; (g) 粉砂质泥岩—细晶白云岩, PS2井, 7 275.85~7 276.09 m; (h) 含粉砂质灰质鲕粒白云岩—灰质粉砂质泥岩, PY1井, 6 903.36~6 903.58 m; (i) 含粉砂质灰质鲕粒白云岩—灰质粉砂质泥岩, PY1井, 6 903.71~6 903.81 m

图4 研究区沧一段混积层系类型

Fig. 4 Types of mixed sedimentary strata in the first member of Canglangpu Formation in the study area

4 混合沉积类型及混积岩分布

4.1 混合沉积类型

根据混积岩的成因、成分、结构和沉积构造等,可将混合沉积类型分为渐变式、突变式和复合式 3 类^[24],其中复合式混合沉积按上、下岩层界面是否为岩性突变界面,又可分为复合式 I 型和复合式 II 型。研究区沧一段混合沉积可分为复合式 I 型、复合式 II 型及渐变式混合沉积 3 种类型。

(1)复合式 I 型混合沉积。在正常沉积环境中,沉积岩与上、下岩层呈岩性突变接触沉积。主要发育于沧一段中部及下部,为碎屑岩—碳酸盐岩层系。以鲕粒云岩、鲕粒灰岩、生屑灰岩等碳酸盐岩,与白云质粉砂岩、灰质粉砂岩、白云质泥岩等碎屑岩发生岩性突变为特征,二者层系界面为岩性突变界面(见图 5(a))。当碎屑岩沉积结束时,研究区海平面迅速下降,开始沉积碳酸盐岩,形成复合式 I 型混合沉积。

(2)复合式 II 型混合沉积。沉积岩在形成过程中经历气候变化、水动力条件变化等突发事件,导致与上、下岩层之间在成分、结构和构造上呈逐渐过渡的关系。主要发育于沧一段下部,为混积岩层系和碎屑岩—混积岩层系。其中,混积岩以含云砂质鲕粒灰岩、含砂质鲕粒白云岩和钙质粉砂质泥岩为主(见图 5(b)),碎屑岩主要为粉砂质泥岩和泥质粉砂岩,二者层系界面为岩性渐变界面。在沉积过程中,沉积岩中的陆源碎屑物质通过风的搬运作用沉积于原始沉积物,受风暴沉积影响,导致海平面升降,形成复合式 II 型混合沉积。

(3)渐变式混合沉积。在成分、结构及构造上,某一岩层与上、下相邻的岩石呈不具有突变标志的、渐进式过渡关系的混合沉积类型(见图 5(c))。与海平面变化密切相关,体现为海退使碳酸盐岩混有少量陆源碎屑,海进使较纯碳酸盐岩继续沉积。

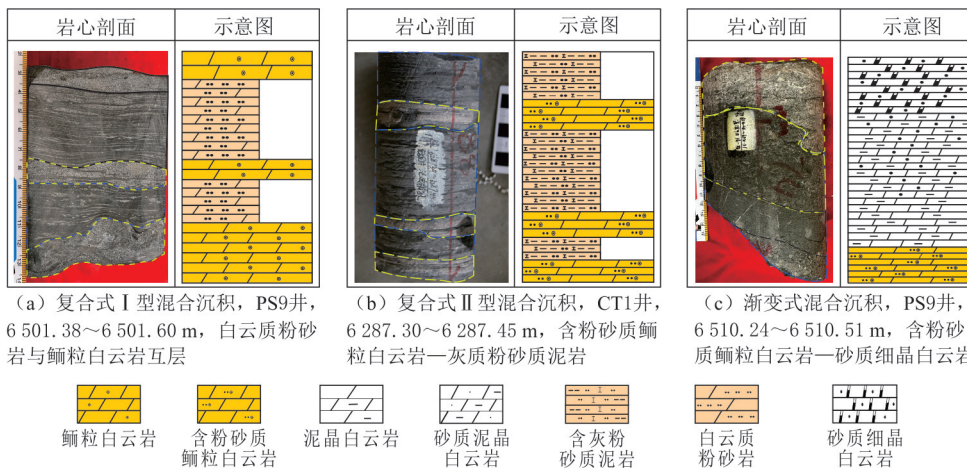


图 5 研究区沧一段混合沉积类型

Fig. 5 Types of mixed sediments in the first member of Canglangpu Formation in the study area

4.2 混积岩分布

4.2.1 纵向分布

川中地区下寒武统发生 5 期大风暴,其中沧浪铺组发生 1 期大风暴。根据风暴序列的划分,将沧浪铺组的大风暴划分为 4 个次级小风暴^[25-26],集中发生于沧一段。以研究区 CT1 井为例(见图 6),根据海平面变化可将沧一段分为 3 个四级旋回(见表 1)。

研究区沧一段陆源碎屑颗粒体积分数与风暴活动期次呈明显的对应关系。第一个风暴沉积期,陆源碎屑体积分数为 4%~80%;第二个风暴期,陆源碎屑体积分数为 2%~85%;第三个风暴期,陆源碎屑体积分数为 1%~45%;第四个风暴期,陆源碎屑体积分数显著升高,为 50%~85%。风暴平息期的陆源碎屑体积分数稳定为 5%~10%。风暴期的陆源碎屑体积分数普遍高于风暴平息期的,验证研究区沧一段的混积作用受风暴活动影响强烈^[25],混积层段的形成多集中发生在风暴活动较频繁的阶段。

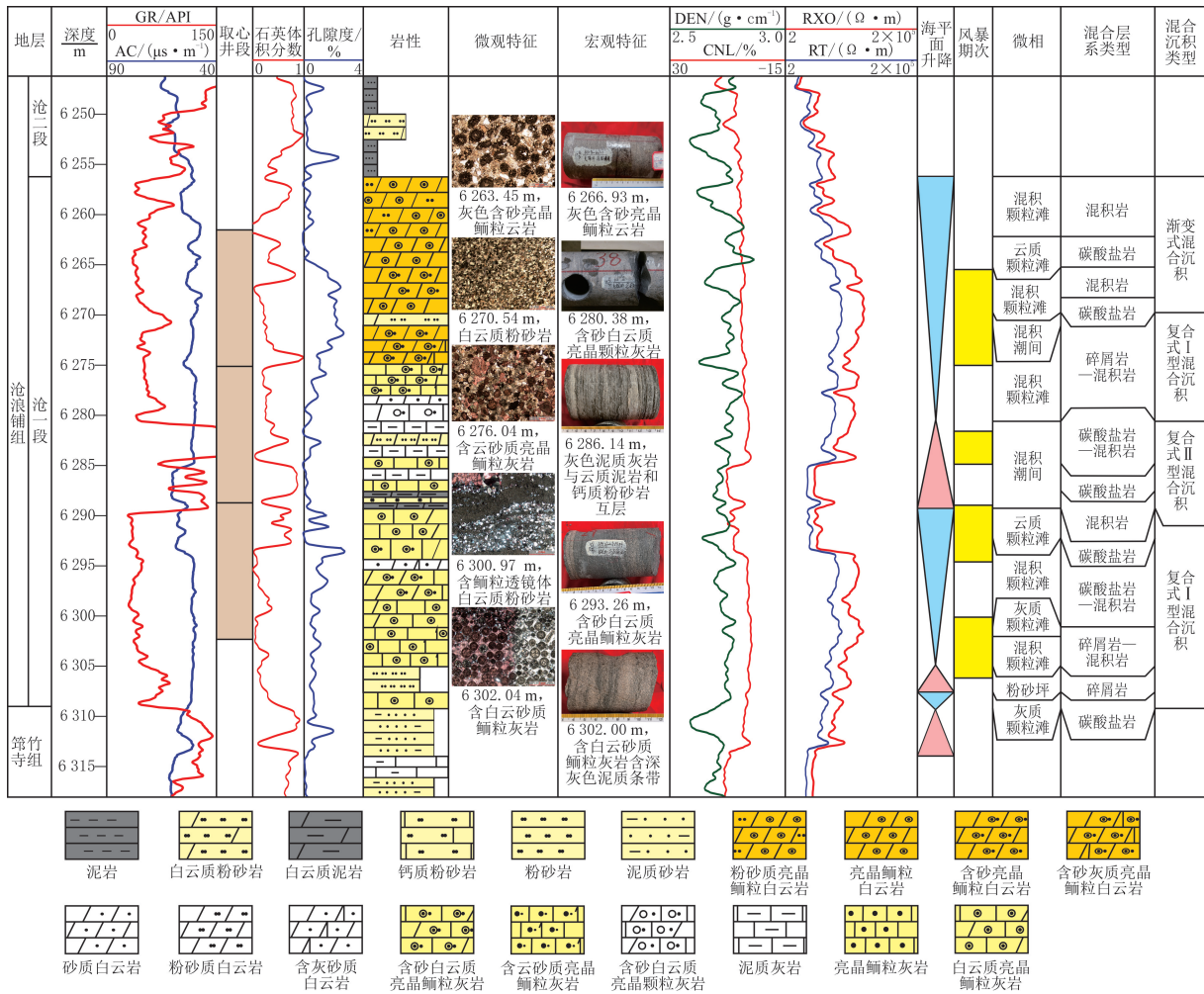


图 6 研究区 CT1 井沧一段混合沉积纵向分布特征

Fig. 6 Longitudinal distribution characteristics of mixed sediments in the first member of Canglangpu Formation of well CT1 in the study area

表 1 研究区 CT1 井沧一段旋回特征

Table 1 Cyclic stratigraphy of the first member of Canglangpu Formation in well CT1 in the study area

旋回	岩性	沉积微相	厚度/m	石英体积分数/%
旋回一	海侵: 泥质砂岩	砂泥坪	5.0	20~60
海退	鲕粒灰岩	灰质颗粒滩	1.3	5~10
旋回二	海侵: 粉砂岩	粉砂坪	1.5	4~15
海退	含白云质砂质鲕粒灰岩、白云质粉砂岩、白云质鲕粒灰岩、含砂灰质鲕粒白云岩、含灰砂质白云岩、含砂白云质鲕粒灰岩	混积颗粒滩	15.3	20~80
旋回三	海侵: 白云质泥岩、钙质砂岩、泥质灰岩、白云质粉砂岩等互层	混积潮间	8.0	3~35
海退	含砂白云质亮晶颗粒灰岩、砂质白云岩、含云砂质亮晶鲕粒灰岩、含砂灰质亮晶鲕粒白云岩、含砂亮晶鲕粒白云岩、白云质粉砂岩、含砂亮晶鲕粒白云岩	混积颗粒滩	29.5	2~75

4.2.2 平面分布

研究区西侧沧一段广泛发育混合沉积,发育鲕粒云岩、鲕粒灰岩和生屑灰岩等以碳酸盐岩为主的混积岩,PS9、CT1、JT1 和 DB1 等井区的混积岩尤为发育。研究区西侧离物源较近,有更多的陆源碎屑物质输入,主要发育渐变式混合沉积;浪基面附近偶发的风暴流也可导致碎屑岩与碳酸盐岩混积,主要为复合式

混合沉积类型。研究区东侧远离物源区,碎屑物质输入较少,混积岩少发育或不发育。研究区混积岩主要发育于近物源且风暴活动强烈的区域。

5 混合沉积主控因素及沉积模式

研究区沧一段混合沉积过程主要受海平面升降变化、构造运动及风暴活动等因素的影响,微生物及古杯生物通过黏结捕获陆源碎屑颗粒的方式,也在一定程度上对混积岩的形成产生影响^[25]。

受古陆隆起影响,研究区沧一段呈西部相对较高、东部相对较低的缓坡沉积,靠近西侧的区域接受较多的陆源碎屑供给,进而发育混合沉积。混合沉积发育于四级海平面旋回的海侵期和海退早—中期,由于相对海平面频繁升降,水动力条件变化,陆源石英碎屑颗粒不断通过沿岸流或波浪的搬运与碳酸盐岩发育混合沉积。沧浪铺组沉积初期,相对海平面向上变浅,水动力较强,处于“半清水—清水”沉积环境,陆源碎屑供给率小于碳酸盐产率,粉砂级石英颗粒难以沉积,漂浮在海水中,沉积以鲕粒灰岩为主的碳酸盐岩层系;之后,发生快速海侵,海平面上升,沉积水体能量逐渐减弱,大量陆源碎屑物质与碳酸盐岩混合沉积,同时古杯生物开始大量繁殖造丘,微生物黏结捕获陆源碎屑,古杯生物的障积格架导致陆源碎屑物质难以继续搬运并沉积,陆源碎屑物质间歇性供给经沿岸流的长期搬运,水体趋于浑浊,开始发育碎屑岩层系及碎屑岩—混积岩层系,混积岩以含白云质砂质鲕粒灰岩为主;随后,海退期,陆源碎屑物质难以及时输入,研究区转化为“清水”沉积环境,有利于碳酸盐岩的形成。偶发的强烈风暴流等突发事件使陆源碎屑物质被携带到碳酸盐岩沉积区,形成以碳酸盐岩为主的混积岩,进而形成碳酸盐岩—混积岩层系^[27-29]。

由于构造沉降速率和沉积物沉积速率的差异,构造运动也对混合沉积程度产生影响^[30-32]。受古陆构造抬升的影响,研究区西侧沉积物可容纳空间增大,陆源碎屑物质大量输入。研究区 DB1 井区附近基底平缓,有利于微生物大量生长和繁殖,碳酸盐岩迅速堆积,发育混积型碳酸盐岩。

德阳—安岳裂陷槽的隔挡作用使四川盆地沧一段形成“东西分异”的沉积格局。受陆源碎屑物质的影响,德阳—安岳裂陷槽西侧发育混积潮坪沉积环境,裂陷槽东侧发育清水碳酸盐岩缓坡沉积。根据研究区沉积环境、陆源碎屑、混积强度及类型等,刻画沧一段混合沉积模式(见图 7)。研究区主要为碳酸盐岩缓坡沉积,且主要发育以碳酸盐岩为主的混积岩,位于正常浪基面附近的区域受波浪及冲刷作用较强,是混积颗粒滩发育的优势区^[33-34]。沧一段沉积期,康滇古陆、泸定古陆与摩天岭古陆向研究区持续提供物源,碎屑物质不断输入,使研究区西侧接受大量陆源碎屑物质;同时,由于海平面变化频繁,一些陆源碎屑被风暴流携带到研究区,与碳酸盐岩混合沉积形成以碳酸盐岩为主的混积岩^[35]。

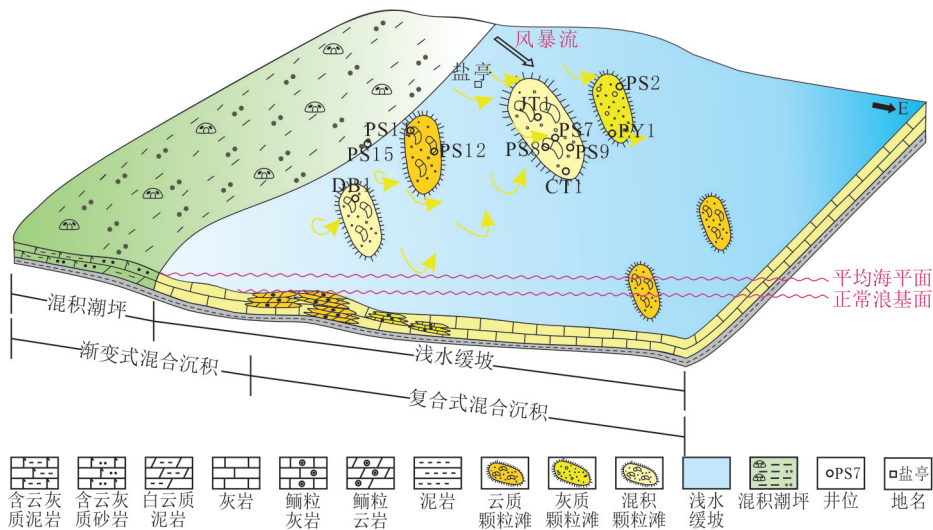


图 7 研究区沧一段混合沉积模式(据文献[36]修改)
 Fig. 7 Mixed sedimentary model of the first member of Canglangpu Formation in the study area(modified by reference[36])

川中地区下寒武统龙王庙组的地质特征与沧浪铺组的类似,发育混积岩,但龙王庙组储层在生产测试过程中发现高产工业气流,下伏沧浪铺组储层仅有几口单井有油气显示,无法达到工业生产条件。利用岩石薄片和粒度分析等方法,对比两个层位的混合沉积特征,沧一段陆源碎屑石英体积分数为5%~85%,显著高于龙王庙组的(5%~40%);沧浪铺组混积岩石英粒径小于0.4 mm,龙王庙组的大多小于0.1 mm,表明沧一段的混积强度高于龙王庙组的。研究区沧一段几乎全井段发育混积岩,岩性包括混积型碎屑岩和混积型碳酸盐岩,发育混积岩层系、碎屑岩—混积岩层系、碎屑岩—碳酸盐岩层系和碳酸盐岩—混积岩层系,混积类型丰富。龙王庙组混积岩发育程度相对较低,中下段多发育混积型碳酸盐岩,以碳酸盐岩—混积岩层系和混积岩层系为主,表明龙王庙组的混积作用相对较弱^[37]。龙王庙组优质储层主要形成于混积作用较弱或未发生混积的颗粒滩微相,油气勘探重点为局部古地貌高地的弱混积滩相区域。沧一段储层较发育的层段大多为弱混积颗粒滩或没有陆源碎屑混入的颗粒滩。

6 结论

(1)川中古隆起北斜坡下寒武统沧一段混积岩类型主要为(含灰质)钙质粉砂质泥岩、含粉砂质颗粒白云岩、条带状粉砂质白云岩和含泥质条带状含砂灰质鲕粒白云岩等;混积层系类型包括混积岩层系、碎屑岩—混积岩层系、碎屑岩—碳酸盐岩层系和碳酸盐岩—混积岩层系;混合沉积类型为复合式I型混合沉积、复合式II型混合沉积和渐变式混合沉积。陆源碎屑颗粒包含充填于缝合线周围或内部、散布在基质中、分布在碳酸盐岩颗粒之间和碳酸盐岩颗粒内部4种赋存方式。

(2)研究区沧一段混积岩主要发育于近物源区且风暴活动强烈区域,陆源碎屑物质体积分数与风暴活动期次呈明显的对应关系。风暴期的陆源碎屑物质体积分数普遍高于风暴平息期的,混积段的形成多集中发生在风暴活动较为频繁的阶段。

(3)研究区沧一段混合沉积过程受海平面升降变化、构造运动、微生物及风暴活动等因素的显著影响,主要为碳酸盐岩缓坡沉积,发育以碳酸盐岩为主的混积岩。位于正常浪基面附近的区域受波浪及冲刷作用较强,是混积颗粒滩发育的优势区。沧一段沉积期,海平面变化频繁,一些陆源碎屑被风暴流携带到研究区,与碳酸盐岩混合沉积形成以碳酸盐岩为主的混积岩。与龙王庙组混合沉积相比,沧一段陆源石英颗粒体积分数、粒径、混积强度大,且混积类型丰富,混积层系多。沧一段储层较发育的层段大多为弱混积颗粒滩或没有陆源碎屑混入的颗粒滩。

参考文献(References):

- [1] 陈培元. 阿联酋X油田下白垩统哈布桑组上段海相碳酸盐岩储层成因机制[J]. 东北石油大学学报, 2021, 45(4): 1-14.
CHEN Peiyuan. Genetic mechanism of marine carbonate reservoir in upper member of Lower Cretaceous Habshan Formation, X Oil-field, United Arab Emirates[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2021, 45(4): 1-14.
- [2] 李明隆, 谭秀成, 李延钧, 等. 四川盆地南部地区上二叠统长兴组沉积微相研究[J]. 特种油气藏, 2020, 27(3): 66-73.
LI Minglong, TAN Xiucheng, LI Yanjun, et al. Sedimentary microfacies characterization of Upper Permian Changxing Formation in Southern Sichuan Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(3): 66-73.
- [3] 唐松, 岳大力, 谭磊, 等. 川中北斜坡地区沧浪铺组一段颗粒滩特征及分布[J]. 断块油气田, 2023, 30(5): 822-830.
TANG Song, YUE Dali, TAN Lei, et al. Characteristics and distribution of grain shoal in the first member of Canglangpu Formation in the north slope area of Central Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2023, 30(5): 822-830.
- [4] 文舰, 彭军, 陈友莲, 等. 四川盆地中部—北部地区沧浪铺组层序地层研究[J]. 断块油气田, 2020, 27(4): 424-431.
WEN Jian, PENG Jun, CHEN Youlian, et al. Study on sequence stratigraphy of Canglangpu Formation in the Central-Northern Sichuan Basin[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2020, 27(4): 424-431.
- [5] 刘仿韩, 苏春乾, 杨友运, 等. 米仓山南坡寒武系沉积相分析[J]. 长安大学学报(地球科学版), 1987, 9(4): 1-12.
LIU Fanghan, SU Chunqian, YANG Youyun, et al. Sedimentary facies analysis of Cambrian in the south of Micang Mountain[J]. Journal of Chang'an University(Earth Science Edition), 1987, 9(4): 1-12.
- [6] 王振宇, 曾浩, 屈海洲, 等. 四川盆地北部地区寒武系沧浪铺组沉积演化[J]. 断块油气田, 2023, 30(5): 808-815.
WANG Zhenyu, ZENG Hao, QU Haizhou, et al. Sedimentary evolution of the Cambrian Canglangpu Formation in Northern Sichuan

- Basin[J]. *Fault-Block Oil & Gas Field*, 2023,30(5):808-815.
- [7] 屈海洲,邹兵,张连进,等. 川中北部地区寒武系第二统沧浪铺组一段孔隙特征、成因及演化模式[J]. *沉积学报*, 2024,42(5):1723-1737.
QU Haizhou, ZOU Bing, ZHANG Lianjin, et al. Pore characteristics, genesis, and evolution model of the first member of the Canglangpu Formation from the Cambrian Series 2 in the Central and Northern Sichuan Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2024,42(5):1723-1737.
- [8] 佟欢,朱世发,崔航,等. 渤海湾盆地桩海地区古近系沙河街组一段—二段混积岩优质储层特征与控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2024,45(4):1106-1120.
TONG Huan, ZHU Shifa, CUI Hang, et al. Characteristics and controlling factors of high-quality reservoirs of mixed siliciclastic-carbonate sediments in the 1st to 2nd members of the Paleogene Shahejie Formation, Zhuanghai Area, Bohai Bay Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2019,45(4):1106-1120.
- [9] 曾楷,李飞,龚峤林,等. 寒武系第二统仙女洞组混合沉积特征及古环境意义:以川北旺苍唐家河剖面为例[J]. *沉积学报*, 2020,38(1):166-181.
ZENG Kai, LI Fei, GONG Qiaolin, et al. Characteristics and paleoenvironmental significance of mixed siliciclastic-carbonate sedimentation in the Xiannüdong Formation, Cambrian(series 2): a case study from the Tangjiahe Section, Wangcang, Northern Sichuan[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020,38(1):166-181.
- [10] MOUNT J F. Mixing of siliciclastic and carbonate sediments in shallow shelf environments[J]. *Geology*, 1984,12(7):432-435.
- [11] 杨朝青,沙庆安. 云南曲靖中泥盆统曲靖组的沉积环境:一种陆源碎屑与海相碳酸盐的混合沉积[J]. *沉积学报*, 1990,8(2):59-66.
YANG Chaoqing, SHA Qing'an. Sedimentary environment of the Middle Devonian Qujing Formation, Qujing, Yunnan Province: a kind of mixing sedimentation of terrigenous clastics and carbonate[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1990,8(2):59-66.
- [12] 张雄华. 混积岩的分类和成因[J]. *地质科技情报*, 2000,19(4):31-34.
ZHANG Xionghua. Classification and origin of mixosedimentite[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2000,19(4):31-34.
- [13] 马艳萍,刘立. 大港滩海区第三系湖相混积岩的成因与成岩作用特征[J]. *沉积学报*, 2003,21(4):607-614.
MA Yanping, LIU Li. Sedimentary and diagenetic characteristics of Paleogene lacustrine "hunji" rock in beach district, Dagang[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003,21(4):607-614.
- [14] 陈世悦,张顺,刘惠民,等. 湖相深水细粒物质的混合沉积作用探讨[J]. *古地学报*, 2017,19(2):271-284.
CHEN Shiyue, ZHANG Shun, LIU Huimin, et al. Discussion on mixing of fine-grained sediments in lacustrine deep water[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2017,19(2):271-284.
- [15] 杨成,王海军,王东,等. 川西南井研地区灯影组沉积相及沉积模式[J]. *东北石油大学学报*, 2020,44(5):59-69.
YANG Cheng, WANG Haijun, WANG Dong, et al. Sedimentary characteristics and model of Dengying Formation in Jingyan Area, Southwest Sichuan Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2020,44(5):59-69.
- [16] 徐少立,马奎,杨强,等. 四川盆地蓬莱气区震旦系灯影组二段储层特征及其控制因素[J]. *特种油气藏*, 2024,31(2):47-56.
XU Shaoli, MA Kui, YANG Qiang, et al. Reservoir characteristics of the second member of Sinian Dengying Formation in Penglai Gas Area of Sichuan Basin and their controlling factors[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2024,31(2):47-56.
- [17] 汪泽成,姜华,王铜山,等. 四川盆地桐湾期古地貌特征及成藏意义[J]. *石油勘探与开发*, 2014,41(3):305-312.
WANG Zecheng, JIANG Hua, WANG Tongshan, et al. Paleo-geomorphology formed during Tongwan tectonization in Sichuan Basin and its significance for hydrocarbon accumulation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014,41(3):305-312.
- [18] 黄博宇. 四川盆地震旦纪—早寒武世岩相古地理与裂陷槽演化[D]. 北京:中国石油大学(北京), 2018:1-69.
HUANG Boyu. The evolution of paleogeographic and rift trough during Sinian-Early Cambrian in Sichuan Basin[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2018:1-69.
- [19] 李亚丁,陈友莲,严威,等. 四川盆地寒武系沧浪铺组沉积演化特征[J]. *天然气地球科学*, 2021,32(9):1334-1346.
LI Yading, CHEN Youlian, YAN Wei, et al. Research on sedimentary evolution characteristics of Cambrian Canglangpu Formation, Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021,32(9):1334-1346.
- [20] 周刚,杨岱林,孙奕婷,等. 四川盆地及周缘寒武系沧浪铺组沉积充填过程及油气地质意义[J]. *岩性油气藏*, 2024,36(5):25-34.
ZHOU Gang, YANG Dailin, SUN Yiting, et al. Sedimentary filling process and petroleum geological significance of Cambrian Canglangpu Formation in Sichuan Basin and adjacent areas[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2024,36(5):25-34.
- [21] 严威,罗冰,周刚,等. 川中古隆起寒武系沧浪铺组下段天然气地质特征及勘探方向[J]. *石油勘探与开发*, 2021,48(2):290-302.
YAN Wei, LUO Bing, ZHOU Gang, et al. Natural gas geology and exploration direction of the Cambrian Lower Canglangpu Member in Central Sichuan Paleo-uplift, Sichuan Basin, SW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021,48(2):290-302.
- [22] 郭福生,严兆彬,杜杨松. 混合沉积、混积岩和混积层系的讨论[J]. *地学前缘*, 2003,10(3):68.

- GUO Fusheng, YAN Zhaobin, DU Yangsong. Discussion on mixed deposits, mixed deposits and mixed deposits series[J]. *Earth Science Frontiers*, 2003,10(3):68.
- [23] 董桂玉,陈洪德,何幼斌,等. 陆源碎屑与碳酸盐混合沉积研究中的几点思考[J]. *地球科学进展*,2007,22(9):931-939.
DONG Guiyu, CHEN Hongde, HE Youbin, et al. Some problems on the study of the mixed siliciclastic-sediments[J]. *Advances in Earth Science*, 2007,22(9):931-939.
- [24] 杨波. 碎屑岩与碳酸盐岩混积陆表海盆地层序与沉积体系研究:以塔里木盆地石炭系巴楚组为例[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2012:8.
YANG Bo. Study on stratigraphic sequence and sedimentary system of clastic rock and carbonate mixed epicontinental basin: a case study of the Bachu Formation of Carboniferous System, Tarim Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2012:8.
- [25] 田立洲,宋金民,叶玥豪,等. 川中地区北部下寒武统沧浪铺组一段风暴岩特征及沉积地质意义[J]. *石油实验地质*,2024,46(2):299-310.
TIAN Lizhou, SONG Jinmin, YE Yuehao, et al. Characteristics and sedimentary geological significance of tempestites in first member of Lower Cambrian Canglangpu Formation in North Central Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2024,46(2):299-310.
- [26] 宋金民,罗平,刘树根,等. 塔里木盆地苏盖特布拉克地区下寒武统风暴岩及其地质意义[J]. *地学前缘*,2014,21(6):346-355.
SONG Jinmin, LUO Ping, LIU Shugen, et al. Lower Cambrian tempestites and their geological significances in Sugaitblak Area, Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2014,21(6):346-355.
- [27] AGER D V. The nature of the stratigraphical record[M]. 3rd ed. London: MacMillan, 1973:114.
- [28] 刘宝珩,张继庆,许效松. 四川兴文四龙下二叠统碳酸盐风暴岩[J]. *地质学报*,1986,60(1):55-67.
LIU Baojun, ZHANG Jiqing, XU Xiaosong. On the calcareous tempestites in the Lower Permian of Silong, Xingwen, Sichuan[J]. *Acta Geologica Sinica*, 1986,60(1):55-67.
- [29] 张国仁. 华北地台东部早中寒武世古气候的识别标志及变化旋回[J]. *辽宁地质*,1997(4):282-290.
ZHANG Guoren. Recognition marks and variation cycle of Early-Middle Cambrian paleoclimate in the east of North China Platform [J]. *Liaoning Geology*, 1997(4):282-290.
- [30] 张锦泉,叶红专. 论碳酸盐与陆源碎屑的混合沉积[J]. *成都地质学院学报*,1989,30(2):87-93.
ZHANG Jinquan, YE Hongzhan. A study on carbonate and siliciclastic mixed sediments[J]. *Journal of Chengdu College of Geology*, 1989,30(2):87-93.
- [31] 董桂玉,何幼斌,陈洪德,等. 惠民凹陷沙一中湖相碳酸盐与陆源碎屑混合沉积:以山东商河地区为例[J]. *沉积学报*,2007,25(3):343-350.
DONG Guiyu, HE Youbin, CHEN Hongde, et al. Mixed sedimentation of Carbonates of lagoonal facies and terrigenous clastics of the middle submember of member 1 of Shahejie Formation in Huimin Sag: taking Shanghe Area in Shandong Province for an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007,25(3):343-350.
- [32] 江茂生,沙庆安. 碳酸盐与陆源碎屑混合沉积体系研究进展[J]. *地球科学进展*,1995,10(6):551-555.
JIANG Maosheng, SHA Qing'an. Research advances in the mixed siliciclastic-carbonate sedimentary systems[J]. *Advances in Earth Science*, 1995,10(6):551-555.
- [33] 王瀚,李智武,刘树根,等. 扬子地台北缘城口地区上寒武统洗象池组风暴沉积特征及其地质意义[J]. *石油实验地质*,2019,41(2):176-184.
WANG Han, LI Zhiwu, LIU Shugen, et al. Sedimentary characteristics and geological significance of tempestites in the Upper Cambrian Xixiangchi Formation, Chengkou Area, northern margin of the Yangtze Platform[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019,41(2):176-184.
- [34] 金鑫,宋金民,刘树根,等. 西昌盆地新基姑地区大箐组风暴岩特征及其地质意义[J]. *沉积学报*,2021,39(4):908-917.
JIN Xin, SONG Jinmin, LIU Shugen, et al. Characteristics and geological significance of tempestites in the Daqing Formation, Xinchang Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021,39(4):908-917.
- [35] GARTRELL A P. Rheological controls on extensional styles and the structural evolution of the Northern Carnarvon Basin, North West Shelf, Australia[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2000,47(2):231-244.
- [36] 汪涵,吕奇奇,高永亮,等. 鄂尔多斯盆地青龙山剖面中寒武统沉积特征及沉积模式[J]. *东北石油大学学报*,2024,48(4):1-15.
WANG Han, LYU Qiqi, GAO Yongliang, et al. Sedimentary characteristics and evolution model of the Middle Cambrian in the Qinglongshan Section, Ordos Basin[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2024,48(4):1-15.
- [37] 王瀚,李智武,刘树根,等. 川北地区下寒武统龙王庙组混积特征及其对储层的影响[J]. *石油实验地质*,2019,41(5):663-673.
WANG Han, LI Zhiwu, LIU Shugen, et al. Characteristics of mixed sediments and influence on reservoir of Lower Cambrian Longwangmiao Formation, Northern Sichuan Basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2019,41(5):663-673.