

## 川北下寒武统仙女洞组台缘斜坡碳酸盐岩重力流沉积

廖纪佳<sup>1,2</sup>, 马思豪<sup>1,2</sup>, 廖明光<sup>1,2\*</sup>, 林丹<sup>3,4</sup>

1. 四川省天然气地质重点实验室, 西南石油大学, 成都 610500;
2. 西南石油大学地球科学与技术学院, 成都 610500;
3. 页岩气评价与开采四川省重点实验室, 成都 610091;
4. 四川省煤田地质局, 成都 610072

**摘要:** 基于重力流剖面的野外观察、露头解剖及镜下鉴定等分析手段, 对四川盆地北部下寒武统仙女洞组台缘斜坡碳酸盐岩重力流沉积及发育机制进行了研究。研究区位于仙女洞组, 主要沉积粉砂质泥岩、生屑泥晶灰岩、藻灰岩等3种岩石类型; 根据层面上产出形态的不同, 将该区碳酸盐岩重力流沉积分为似瘤状碳酸盐岩重力流沉积和角砾型碳酸盐岩重力流沉积2类。结合露头区重力流沉积物粒度及岩性变化, 将碳酸盐岩重力流沉积由下至上划分出5个发育期次, 期次内部重力流沉积物由细变粗, 纵向上呈现出明显的叠置关系, 与仙女洞组时期所经历的海退环境大致吻合。地震、风暴浪等触发机制导致台缘斜坡上部松散沉积的灰泥丘块体发生破碎并沿斜坡发生滑塌, 伴随水体注入, 大块砾石在沉积物—水体混合的环境中发生破碎搅动, 形成大小不等的块体, 深水底流等作用对未固结或弱固结的砾屑灰岩进行溶蚀、改造, 最终形成了层面形态特征不同的2类似瘤状碳酸盐岩重力流沉积。角砾型碳酸盐岩重力流沉积则主要是未破碎的巨型灰泥丘块体经搬运和短距离滑塌, 最终与似瘤状砾屑灰岩共同沉积而成。

**关键词:** 寒武系; 仙女洞组; 台缘斜坡; 碳酸盐岩重力流沉积; 发育机制

中图分类号: P618.1

文献标识码: A

文章编号: 1006-7493 (2018) 02-0263-10

## Characteristics and Developmental Mechanism of the the Early Cambrian Carbonate Gravity Flow Deposits in Platform Marginal Slope of the Northern Sichuan

LIAO Jijia<sup>1,2</sup>, MA Sihao<sup>1,2</sup>, LIAO Mingguang<sup>1,2\*</sup>, LIN Dan<sup>3,4</sup>

1. Natural Gas Geology Key Laboratory of Sichuan Province, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
2. School of Geoscience and Technology, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;
3. Sichuan Key Laboratory of Shale Gas Evaluation and Exploitation, Chengdu 610091, China;
4. Sichuan Coalfield Geology Bureau, Chengdu 610072, China

**Abstract:** Based on field survey, outcrop analysis and microscopic observbation, we report the basic characteristics of the carbonate gravity flow in platform margin in the lower Cambrian Xiannvdong Formation of the Northern Sichuan Basin and address its developmental mechanism in this paper. Results show that the Xiannvdong Formation typically developed an environment of diamictic carbonate platform marginal slope in shallow water. The bottom of this formation is mainly composed of three rock types, i.e., silty mudstones, bioclastic micritic limestones and algal limestones. According to the planar morphologies, two types of carbonate gravity

收稿日期: 2017-06-22; 修稿日期: 2017-08-20

基金项目: 油气藏地质及开发工程国家重点实验室开放课题 (PLN1523); 四川省教育厅重点项目 (16ZA0078); 西南石油大学青年教师“过学术关”项目 (201231010014); 国家自然科学基金青年基金 (41702164); 国家公派出国留学基金 (201608515015) 联合资助

作者简介: 廖纪佳, 1983年生, 男, 博士, 主要从事沉积学和储层地质方面教学科研工作; E-mail: liaojijia198433@163.com

\*通讯作者: 廖明光, 男, 教授, 从事储层地质学、油气田开发地质教学与研究工作; E-mail: liaomg@swpu.edu.cn

flow deposits were classified, including nodular-like and brecciated. Based on the grain size and lithological variation of the gravity flow sediments in outcrops, five developmental stages were divided, which show an obvious superposition relationship vertically. The grain size of these sediments roughly changes from fine to coarse within sedimentary cycles, consistent with the regressive environment of the Xiannvdong period in general. In the vicinity of the platform marginal slope, slide and slump events occurred due to the triggering of geological events, e.g., earthquake and storm. The mound and shoal mass moved down along the slope, and some of the blocks migrated and deposited here, which formed the brecciated carbonate gravity flow deposits. With the increasing injection of water, the amount of sediment-water mixture and the decomposition of the material rose, and some of the mass were broken and flowed as similar forms of debris flow along the slope, and then the debris transformed into carbonate gravity flow deposits with plastic rheological characteristics. Then, these deposits might be reworked by bottom current or experienced corrosion from seawater after deposition to form two types of nodular-like carbonate gravity flow sediments. In contrast, the brecciated carbonate gravity flow sediments were products of transportation and short-distance slumping of mega unbroken carbonate mound mass. They are co-deposited with the nodular-like calcirudites.

**Key words:** Cambrian; Xiannvdong Formation; platform marginal slope; carbonate gravity flow; developmental mechanism

**Corresponding author:** LIAO Mingguang, Professor; E-mail: liaomg@swpu.edu.cn

## 1 引言

从浊流理论建立至今的近70年时间里,重力流沉积的研究经历了螺旋式的上升旋回(李相博等,2013)。从经典浊流的“鲍马序列”(Bouma,1962)到各类深水沉积扇模式的提出(Mutti,1977; Normark, 1978; Walker, 1978; Vail, 1991),从高密度浊流(Kuenen and Migliorini, 1950)概念的设想再到砂质碎屑流(Shanmugam, 1996, 2000, 2013)理论的批判,重力流沉积研究成果在争论中得以丰富并取得了极大进展。但是,与碎屑岩重力流丰富的理论研究成果相比,碳酸盐岩重力流沉积的研究相对滞后,国内仅有少数学者对碳

酸盐岩裙(carbonate apron)沉积和碳酸盐岩海底扇(carbonate submarine fans)沉积进行过跟踪研究(牛新生和王成善,2010)。目前,国内仅有部分关于南方地区碳酸盐岩重力流的记录,前人在碳酸盐岩重力流沉积的研究中,主要从研究区的重力流沉积物类型、沉积特征及流动支撑机制等方面进行沉积模式的探讨(高振中和段太中,1985; 王一刚,1986; 刘宝珺等,1990; 陈志明,1991; 郭建华等,1997; 沈骋等,2015),但鲜有学者就纵向叠置关系、发育期次等方面研究碳酸盐岩重力流的触发机制。

作者在对川北米仓山唐家河剖面(图1)进行野外地质考察的过程中发现,研究区仙女洞组剖

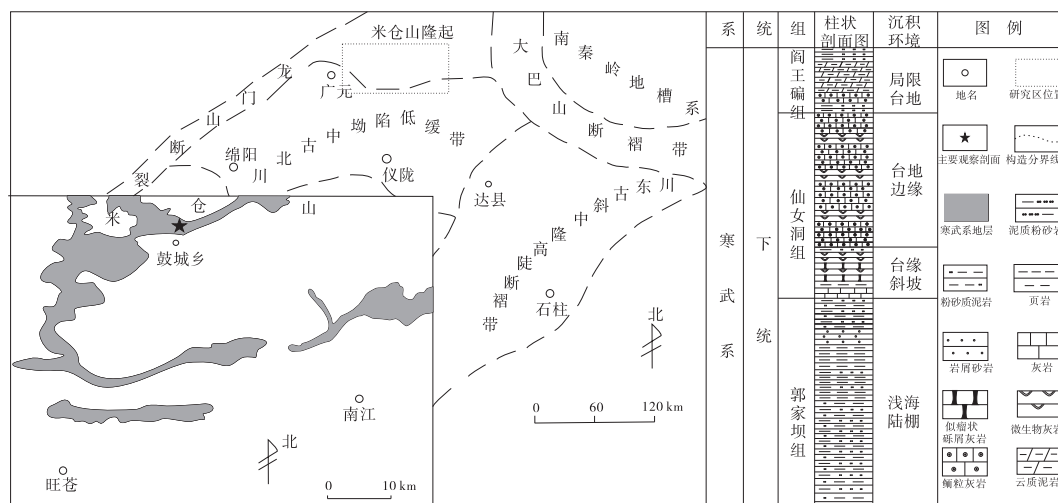


图1 川北旺苍县唐家河剖面位置与下寒武统岩性柱状图(据沈骋等,2015)

Fig. 1 Location of the Tangjiahe section in Wangcang County, northern Sichuan Basin and generalized stratigraphic column of the Lower Cambrian in the study area

面下段发育碳酸盐岩重力流沉积，并呈现出明显的垂向叠置和多期次性等特征。鉴于此，本文以川北广元地区旺苍县鼓城乡唐家河剖面为例，结合野外地质考察、剖面实测等手段，从叠置关系、发育期次性等方面深入研究本区碳酸盐岩重力流沉积，揭示其内部沉积组构特征、触发机制和主控因素，研究成果对四川盆地北部地区古地理格局的研究富有理论意义。

## 2 区域地质背景

研究区位于四川盆地北部米仓山西南缘旺苍一带（图1）。米仓山地处扬子克拉通西北缘，北侧为汉南推覆构造和秦岭造山带，西侧为龙门山

推覆构造带和松潘—甘孜造山带，东邻大巴山推覆构造带，南接四川盆地（刘登忠等，1997）。四川盆地寒武系沉积了一套海相碳酸盐岩夹碎屑岩地层（李皎和何登发，2014），自下而上依次沉积筇竹寺组、沧浪铺组（米仓山地区进一步划分为仙女洞组和阎王碛组）、龙王庙组、陡坡寺组和洗象池群，川北地区早寒武世主要表现为浅海环境（牟传龙等，2012）。总体上，四川盆地寒武纪经历了两个半海侵—海退旋回，海侵发生在筇竹寺期、龙王庙期和洗象池期，海退发生在沧浪铺期和陡坡寺期（张满郎等，2010）。

本次研究实测剖面为郭家坝组顶部至仙女洞组底部的连续沉积地层，剖面共计50.4 m（图2）。

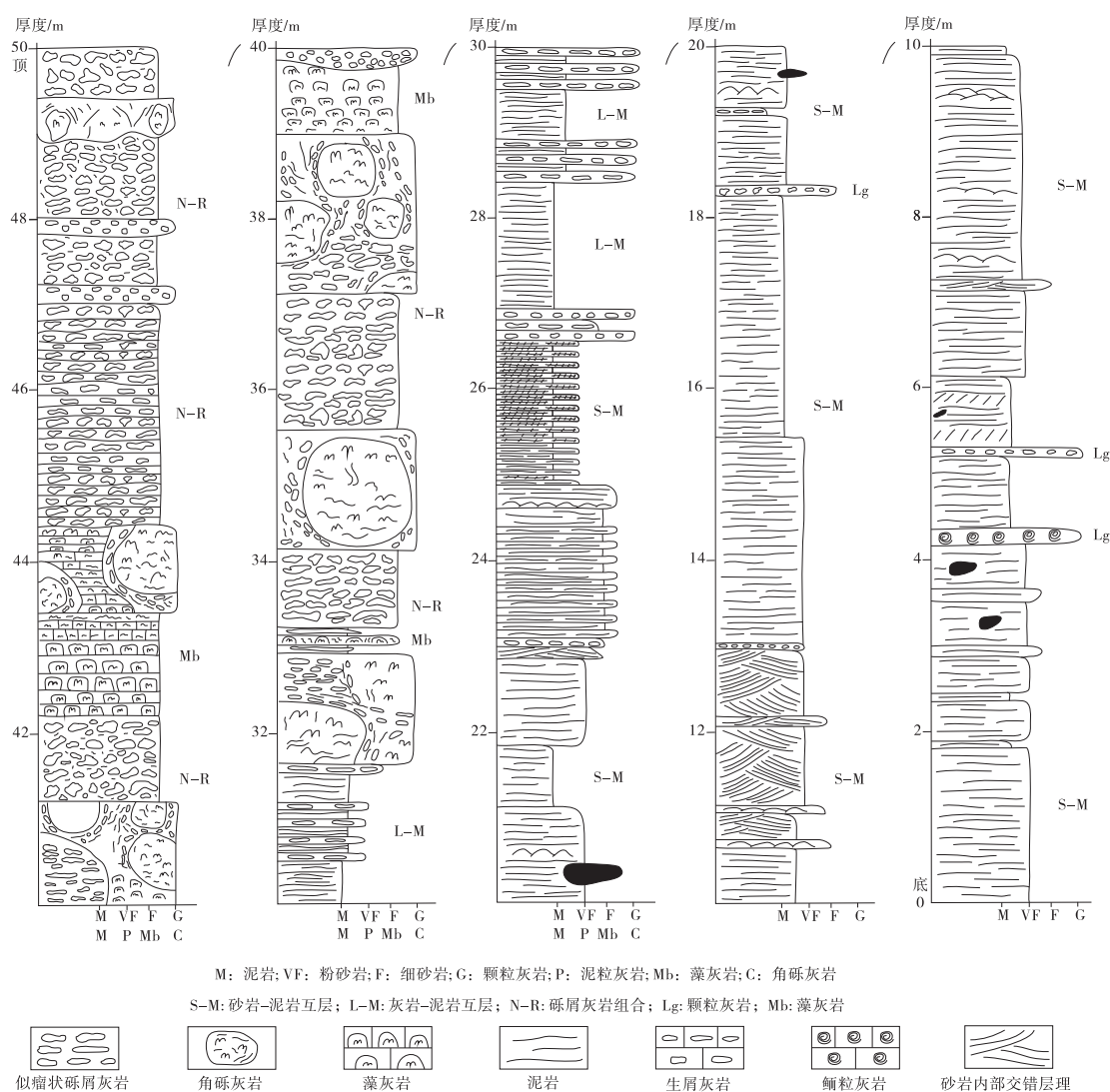


图2 川北旺苍县唐家河剖面下寒武统仙女洞组底部台缘斜坡相实测剖面柱状图

Fig. 2 Measured lithological column of the platform marginal slope facies from the Lower Cambrian Xiannvdong Formation at the Tangjiahe section in Wangcang County, northern Sichuan Basin

其中,郭家坝组顶部实测厚度为26.84 m,岩性主要以细粒碎屑岩为主,含灰色至灰绿色的粉砂岩、泥质粉砂岩等,夹中层鲕粒灰岩和生屑灰岩,可见波痕和小型交错层理,常见生物扰动构造、生物钻孔,指示浅海陆棚沉积环境;仙女洞组底部实测厚度为23.16 m,岩性以生屑灰岩、粉砂质泥岩、灰绿色泥岩为主,层中可见粉砂质泥和泥质粉砂支撑的碳酸盐砾石,砾石内富含古生物化石,总体上指示浅海混积碳酸盐岩台缘斜坡的沉积环境。

对川北米仓山地区鼓城乡唐家河剖面进行了精细测量,并采集了大量岩石标本。实验室镜下分析观察,认为研究区仙女洞组底部台缘斜坡碳酸盐岩重力流沉积按照形态和发育机制可分为似瘤状碳酸盐岩重力流沉积和角砾型碳酸盐岩重力流沉积2类,其中,似瘤状碳酸盐岩重力流根据层面上产出形态的不同还可进一步分为断续型(I)和杂乱型(II)2类。

### 3 台缘斜坡沉积特征

通过剖面实测和岩石薄片镜下分析,笔者在仙女洞组共计23.16 m的研究区段中识别出3类岩石类型并划分出2类碳酸盐岩重力流沉积。根据碳酸盐岩重力流沉积产出形态和发育机制,又将其进一步划分为似瘤状碳酸盐岩重力流沉积和角砾型碳酸盐岩重力流沉积两类。

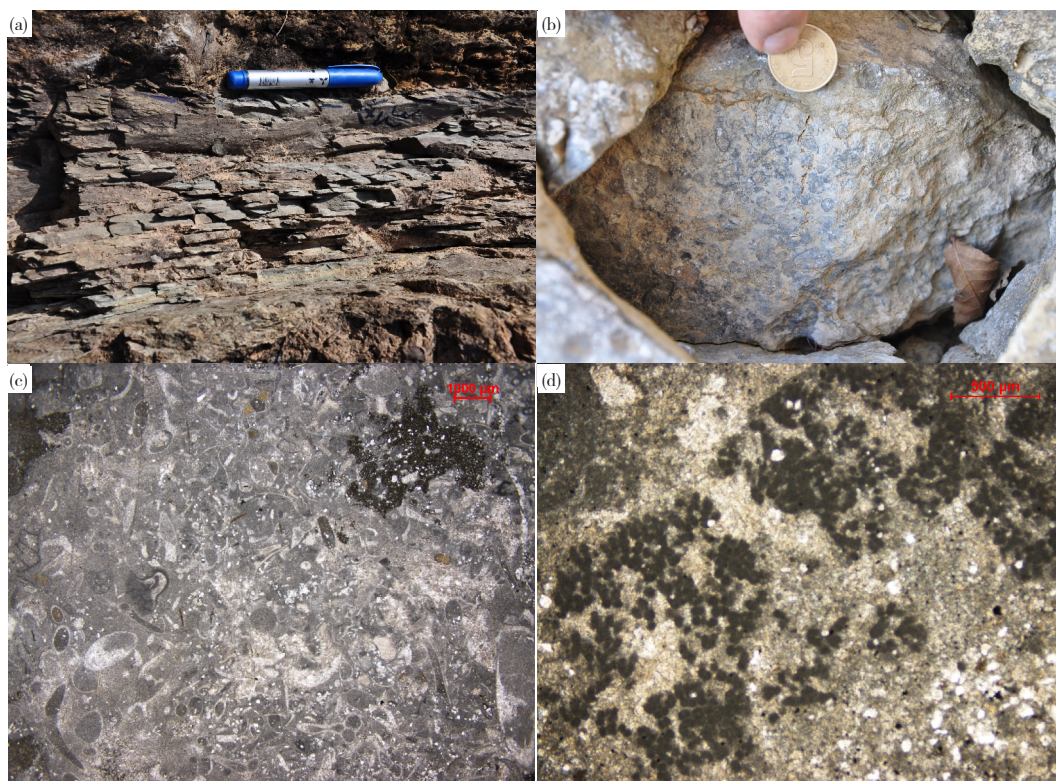
#### 3.1 岩石类型

##### 3.1.1 粉砂质泥岩

多呈灰色至深灰色薄层状产出(图3a),泥质含量达60%以上,镜下可见约20%左右的石英粉砂,粉砂局部富集,形成薄层泥质粉砂条带。层中偶见水平层理及砂纹层理等。由此推知,其可能形成于受水流影响相对较小的低能环境。

##### 3.1.2 生屑泥晶灰岩

多呈灰色至深灰色、中—厚层状产出,颗粒主要为生物碎屑,碎屑以古杯为主(图3b),镜下



(a) 野外外露的薄层粉砂质泥岩,图中笔长12.8 cm; (b) 生屑灰岩中古杯类碎屑,图中硬币直径20.5 mm;  
(c) 生屑泥晶灰岩中的生物碎屑,单偏光; (d) 呈枝状的表附藻类,单偏光

图3 唐家河剖面下寒武统仙女洞组下段台缘斜坡相岩石特征

Fig. 3 Lithological features of the platform marginal slope facies from the bottom of the Lower Cambrian Xiannvdong Formation at the Tangjiahe section

可见缝合线切穿古杯，生屑含量约为 50%~55%，灰泥基质约占 30%（图 3c）。局部具有重结晶的特征，有极少量的极细石英粉砂混入，也可见少量鲕粒存在。泥晶灰岩指示其形成于低能环境。

### 3.1.3 藻灰岩

多呈灰色至深灰色块状产出，微生物为表附藻类，镜下可见呈枝状分布（图 3d），层内不同区域，藻类含量约占 10%~40% 不等。镜下可见泥质充填裂缝和方解石脉，切穿古杯生物。枝状藻类粘结灰泥形成粘结格架，格架间为灰泥，含量占 10%~55% 不等。由此推知，其可能形成于灰泥丘等低能沉积环境中。

## 3.2 碳酸盐岩重力流沉积

研究区仙女洞组底部之上发育多期灰泥丘沉积，可识别出台缘斜坡藻丘、台缘藻丘和台缘（滩后）古杯丘等，不同期次的灰泥丘主要由砾屑灰岩、生屑泥晶灰岩、（附枝）藻格架凝块灰岩等组成（张廷山等，2005；沈骋等，2016）。经镜下对比分析，笔者发现研究区上部灰泥丘中枝状附枝藻、古杯动物以及其它类型的生物碎屑，在种类和含量上与本期重力流砾屑中的生屑种类和含

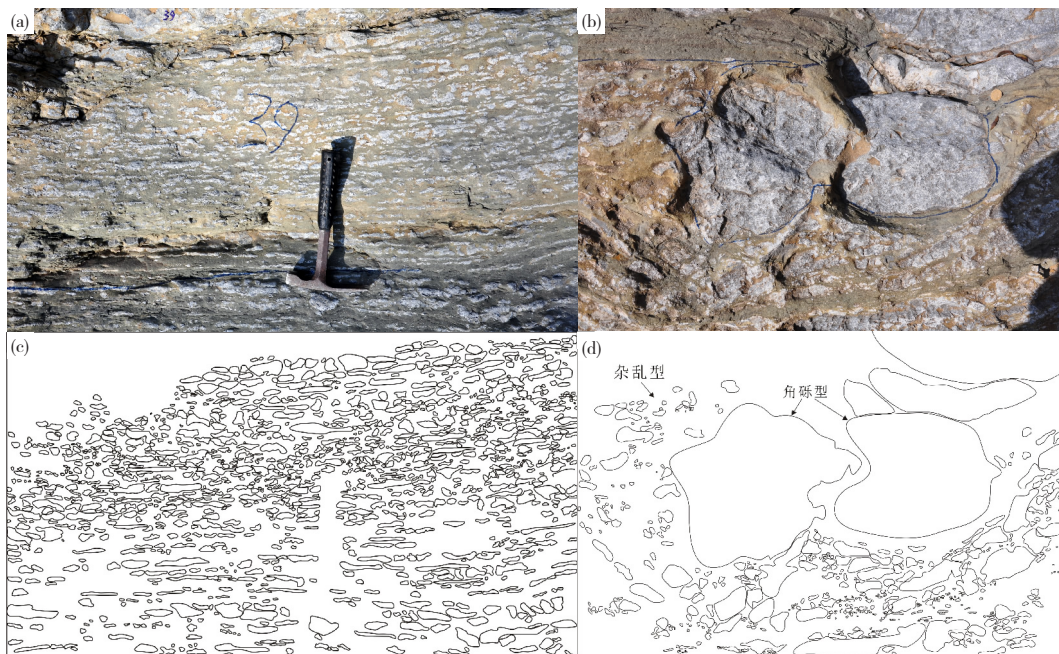
量大致相当。由此推断，仙女洞组底部主要为异地搬运的重力流沉积，块体自灰泥丘搬运至附近的台缘斜坡并逐渐转变为异地沉积。

### 3.2.1 似瘤状碳酸盐岩重力流沉积

由于同瘤状灰岩、蠕虫状灰岩相似的形态特征（朱洪发和王恕一，1992；靳学斌等，2014），故命名似瘤状碳酸盐岩重力流沉积。沉积物呈灰色似瘤状产出，砾石的岩性主要为生屑泥晶灰岩，具滑塌变形特征。在研究区仙女洞组下段可见两类形态特征不同的似瘤状碳酸盐重力流沉积：断续型（I）和杂乱型（II），其中最常见的是断续型（I型）。

I型似瘤状碳酸盐重力流沉积，砾径 2~13 cm 不等，砾径较小的砾石呈次圆到次棱角状，砾径较大（往往大于 5 cm）的砾石呈条带状分布。砾石相互分离、断续排列，为粉砂质泥所充填，但成层性较好（图 4a, c）。

II型似瘤状碳酸盐重力流沉积的分布较 I 型相对较少，砾径仅 2~5 cm 左右，砾石岩性主要为生屑泥晶灰岩，但磨圆度较 I 型好，多为次圆状。砾石杂乱分布，砾石间充填粉砂质泥（图 4b, d）。



(a) I型似瘤状碳酸盐重力流沉积，图中地质锤长 29.5 cm；(b) 角砾型及 II 型似瘤状碳酸盐重力流沉积，可见生屑颗粒，图中硬币直径 20.5 mm；(c) 图 a 素描图；(d) 图 b 素描图

图 4 唐家河剖面下寒武统仙女洞组下段碳酸盐岩型重力流沉积特征（一）

Fig. 4 Sedimentary features of the carbonate gravity flow of platform marginal slope from the bottom of the Lower Cambrian Xiannvdong Formation at the Tangjiahe section (I)

### 3.2.2 角砾型碳酸盐岩重力流沉积

角砾型碳酸盐岩重力流多呈浅灰色至灰色块状产出,角砾大小从厘米级到米级不等、分选性极差,杂乱分布(图4b,图5)。角砾的岩性主要为生屑泥晶灰岩以及藻灰岩。镜下观察发现,藻灰岩中发现的表附藻类与研究区上部台缘灰泥丘在类型和数量上均大致相似。角砾周围可见似瘤状砾石的分布,角砾底部的砾石沿角砾发生明显扭曲,角砾周围的砾石沿角砾表面呈弯曲状分布,且出现明显的流动特征(图4b,图5)。由此推断,角砾型碳酸盐岩重力流主要为泥质和似瘤状砾石(基质)支撑。杂乱分布的角砾和共同产出的似瘤状砾屑灰岩表明其可能形成于斜坡环境,系由斜坡上部的生物丘破碎并短距离滑动形成。

### 3.2.3 重力流沉积的纵向发育序列

在研究区仙女洞组下段可见上述两类碳酸盐岩重力流在纵向上呈现出明显的叠置关系,并具有多期发育的特点。本文根据重力流的沉积物粒度及岩性变化,将露头区碳酸盐岩重力流沉积由下至上划分出5个发育期次(图6),每个期次内部均在纵向上呈现出岩性或粒级的规律性变化。

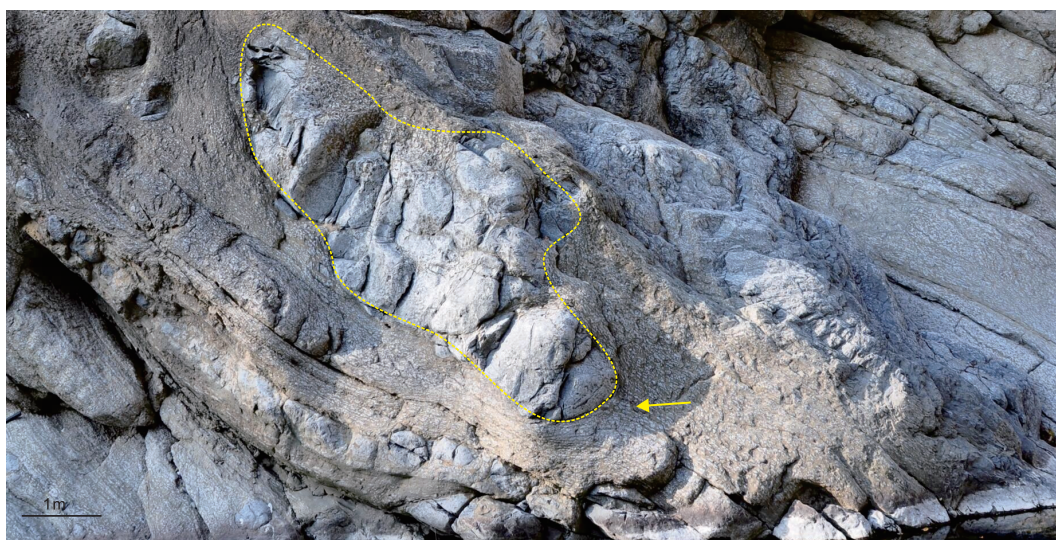
期次I主要为生屑泥晶灰岩,期次内部可见少

量角砾型碳酸盐岩重力流沉积,但角砾砾径较小。该期标志着仙女洞组底部碳酸盐岩型重力流沉积的开始。

期次II底部为一套厚约1.5 m的灰绿色泥岩、粉砂质泥岩,断面呈碎块状(图3a),可见水平层理发育。向上岩性逐渐变为以粉砂质泥和泥质粉砂支撑的砾屑灰岩。角砾砾径相较于第I期明显增大,平均大小18~20 cm,砾屑灰岩以似瘤状形态绕角砾杂乱分布,砾石平均大小2~3 cm,呈次棱角状至棱角状。

期次III的旋回性同期次II类似,底部沉积中一厚层的灰绿色泥岩,向上岩性逐渐变为以粉砂质泥和泥质粉砂支撑的砾屑灰岩。与期次II相比,期次III沉积厚度更大,角砾大多为20 cm×40 cm的大砾石,甚至可见80 cm×225 cm的巨型角砾。砾屑灰岩除部分沿角砾杂乱分布,大部分似瘤状碳酸盐岩重力流沉积表现出了较好的成层性,沿斜坡向下呈流水状分布。

期次IV的重力流沉积达到峰值,该期无论是沉积厚度还是角砾砾径均达到了4个期次中的最大值。似瘤状碳酸盐岩重力流沉积成层性较期次III更好,可见呈条带状分布的砾石。此外,还可见似瘤状砾石沿角砾呈弯曲状分布,且出现明显的流动特征。



沿角砾分布的似瘤状砾屑(黄色箭头所指处)及呈舌状的巨型角砾(黄色虚线所示)

图5 唐家河剖面下寒武统仙女洞组下段碳酸盐岩型重力流沉积特征(二)

Fig. 5 Sedimentary features of the carbonate gravity flow of platform marginal slope from the bottom of the Lower Cambrian Xiannvdong Formation at the Tangjiahe section (II)

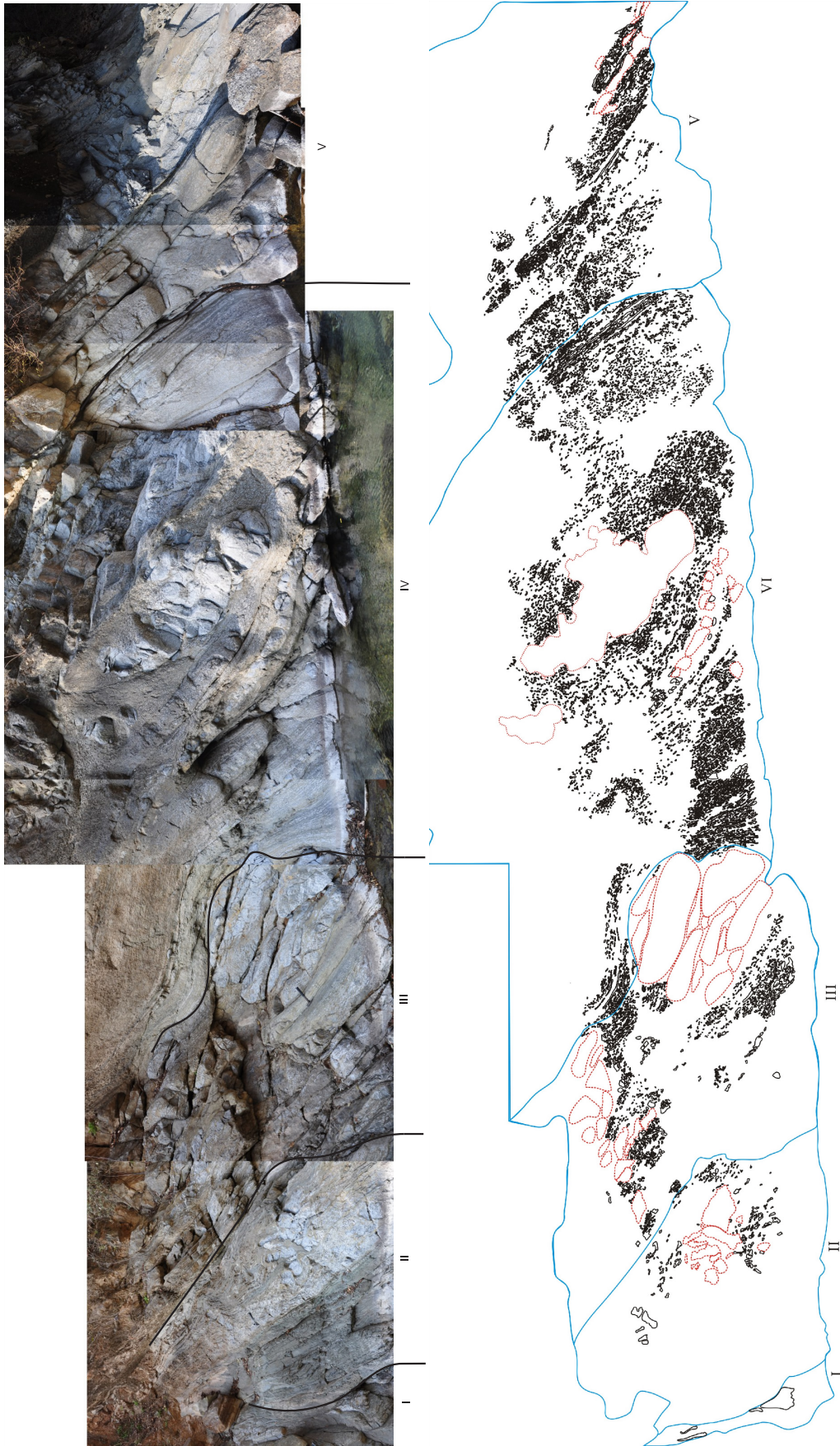


图6 唐家河剖面下寒武统仙女洞组下段台缘斜坡野外照片及素描  
Fig. 6 Photographs (upper) and the field sketch (lower) of the platform marginal slope facies from the bottom of the Lower Cambrian Xiannvdong Formation at the Tangjiahe section

期次V仅可见约20 cm厚的重力流沉积,角砾砾径与期次I大致相当,似瘤状碳酸盐岩重力流沉积的成层性相比期次II和III变差。至此,仙女洞组下段重力流发育终止。

结合仙女洞组下段重力流沉积特征可将该区重力流发育划分为3个阶段:

(1) 期次I和II为重力流沉积初期,此时流体携带的碳酸盐岩块体数量少、体积小,底部以泥岩和粉砂质泥岩等细粒沉积岩为主,顶部沉积异地搬运的碳酸盐岩砾石;

(2) 期次III和IV为重力流沉积中期,流体携带的异地碳酸盐岩块体较上一阶段无论在数量还是体积上都有了明显的增加,沉积物表现出明显的下细上粗的反旋回特征;似瘤状砾石沿角砾发生明显扭曲,呈弯曲状分布。由此推测,巨型角砾为岩块滑塌后沿先期沉积的弱固结或半固结的似瘤状碳酸盐岩重力流沉积物滑动,使得砾石受到挤压而出现变形和流动特征;

(3) 期次V为重力流沉积末期,异地碳酸盐岩块体的数量和体积均明显减弱至重力流发育终止。

总体而言,五个期次在纵向上呈现出明显的叠置关系,期次内部重力流沉积物由细变粗,这也与仙女洞组时期所经历的海退环境大致吻合。

## 4 碳酸盐岩重力流沉积形成机制

### 4.1 似瘤状碳酸盐岩重力流沉积形成机制

有学者认为研究区仙女洞组底部为类似瘤状的变形构造,由于台缘斜坡高陡地貌、沉积层失稳以及重力因素引起水下塌,差异压实使得灰岩层发生应力破碎并被泥质层侵入包绕,经后期差异压溶作用最终形成似瘤状的变形体(沈骋等,2015)。但结合野外观察、岩石变化规律研究以及镜下分析,本文认为仅用变形构造的形成机制来解释似瘤状碳酸盐岩重力流沉积并不完善。应力破碎受到沉积速率、岩层厚度以及裂缝等多种因素的影响(Khan and Al-Shayea, 2000),仅仅因为灰岩与泥岩的塑性差异造成的破碎很难形成分选性和成层性如此之好的砾石。由于碳酸盐岩的成岩速度很快,成层性也不可能仅通过后期的差异压实改造形成(靳学斌等,2014)。

由于仙女洞组台缘斜坡上部发育鲕粒灰岩,

碳酸盐岩台地及其边缘相发育迅速使得台地与斜坡脚的高差斜率逐渐增加,形成陡斜坡环境(沈骋等,2015)。灰泥丘可能在这种较陡的碳酸盐岩台缘斜坡环境发生崩坍、短距离滑动等。目前,关于重力驱动下的块体异地搬运和再沉积作用也已经得到了部分学者的证实(Coniglio and Dix, 1992; 牛新生和王成善,2010)。此外,仙女洞组底部的重力流沉积多为粉砂质泥和泥质粉砂支撑的砾屑灰岩与角砾灰岩,古杯生物与枝状附枝藻等赋存的生物丘常指示陆棚或台缘斜坡环境(韩作振等,2009; 沈骋等,2016)。综合分析表明,本区重力流沉积应为相对深水沉积环境斜坡滑塌的产物。

关于深水重力流沉积的研究,Shanmugam (1996)认为“高密度浊流”的观点出现了概念上的错误,实际上这种以基质强度、分散压力和上浮力作为支撑机制,出现层流等特征的沉积物重力流应为“砂质碎屑流”,其搬运过程划分为砂质滑动、砂质滑塌以及砂质碎屑流这3个基本类型(Shanmugam, 2013)。作者观察研究区碳酸盐岩重力流沉积物后发现,本区重力流沉积物在分布上呈现出成层性好、反粒序以及纵向叠置等特征,这与Shanmugam (2006, 2013)提出的碎屑的逆粒序、面状碎屑组结构(层流)以及厚层块状砂岩叠置等砂质碎屑流的鉴别标志类似,因此笔者借鉴Shanmugam提出的“砂质碎屑流”概念,认为仙女洞组碳酸盐岩重力流可能为“砾质碳酸盐岩重力流”。

仙女洞组沉积时期处于寒武纪首次海退期间,海平面升降或是地壳运动可能触发地震、风暴浪等,导致台缘斜坡上部松散沉积的灰泥丘块体发生破碎并在重力作用下失稳,沿斜坡发生滑塌。滑塌过程水体相对变深,伴随水体注入,大块砾石在沉积物—水体混合的环境中发生破碎搅动,最终形成了大小不等的块体,顺着斜坡呈层状继续向前,最终沉积形成“似瘤状碳酸盐岩重力流”(图7)。由于台缘斜坡较传统意义上的深水沉积(陆坡)水深较浅、坡度较缓,因此“砾质碳酸盐岩重力流”无法再进一步向浊流发生转化。另一方面,由于碳酸盐岩构造在水下受到溶蚀等因素难以保存,故研究区也少见明显的软沉积变形、层面构造等碳酸盐岩重力流的鉴别标



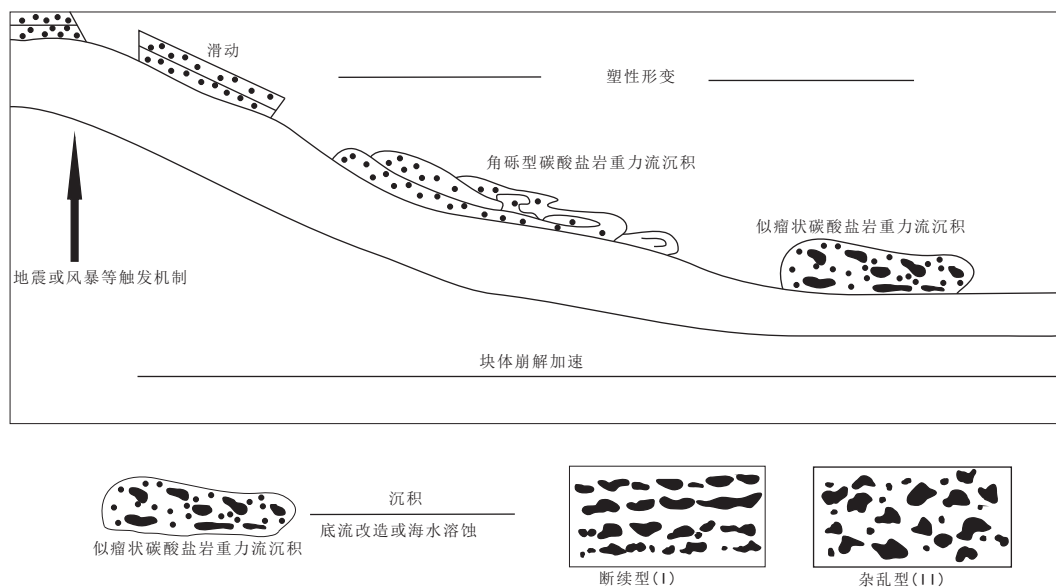


图7 似瘤状碳酸盐岩型重力流沉积发育机制模式图 (据Shanmugam, 2013)

Fig. 7 Model of developmental mechanism for the nodule-like carbonate gravity flow sediments

志。砾石沿斜坡沉积后，海底底流或洋流作用可能对未固结或弱固结的砾屑灰岩进行顺流方向的溶蚀和改造，最终形成了层面形态特征不同的2类似瘤状碳酸盐岩重力流。

#### 4.2 角砾型碳酸盐岩重力流沉积形成机制

台缘斜坡上的大型角砾岩独立分布在似瘤状小型砾石中，角砾周围的砾屑灰岩发生了扭曲，沿着角砾表面呈弯曲状分布，并出现明显的流动特征。由此推断，角砾在沿斜坡滑动的过程中使得已沉积的砾屑灰岩受到挤压，产生变形而呈现流动特征。角砾岩沉积后，下一期重力流发生，砾石沿先期沉积的角砾岩顶面继续沉积分布。这一形成机制与本区重力流沉积反旋回以及纵向叠置、多期性等特征吻合。此外，划分的5个重力流期次内部，角砾型碳酸盐岩重力流沉积通常分布在每个期次内的顶部，而先期主要沉积似瘤状砾屑灰岩，也与研究区重力流沉积能量的变化大致相似。另外，据前人观察对比研究发现，本区呈舌状的角砾岩块体与北京西山发现的滑塌沉积均来自台缘斜坡生物丘（沈骋等，2015）。综合上述分析，角砾型碳酸盐岩重力流沉积的成因是：灰泥丘异地搬运至附近的台缘斜坡后，由于地震风暴、沉积层失稳以及重力因素等，岩块沿斜坡发生短距离滑动，随后遭到灰泥基质或者弱固结灰岩层的“阻碍”而与似瘤状砾屑灰岩共同沉积，再经后期成岩作用改造而成

(图8)，其支撑机制主要为基质强度和分散压力。

## 5 结论

(1) 研究区仙女洞组底部为浅海混积碳酸盐岩台缘斜坡的沉积环境，主要发育粉砂质泥岩、生屑泥晶灰岩、藻灰岩等3种岩石类型以及似瘤状碳酸盐岩重力流沉积和角砾型碳酸盐岩重力流沉积等2种重力流沉积类型。

(2) 地震、风暴浪等触发机制导致台缘斜坡

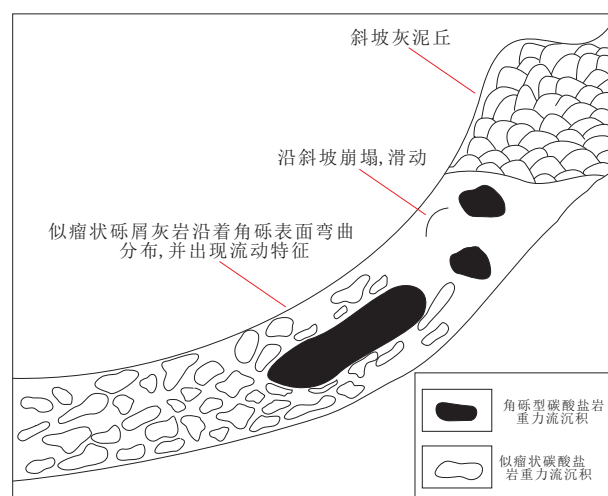


图8 角砾型碳酸盐岩重力流沉积发育机制模式图

(据沈骋等, 2015)

Fig. 8 Model of developmental mechanism for the brecciated carbonate gravity flow sediments

上部松散沉积的灰泥丘块体发生破碎并沿斜坡发生滑塌。滑塌过程伴随水体注入,大块砾石在沉积物—水体混合的环境中发生破碎搅动,最终形成了大小不等的块体,顺着斜坡成流水状继续向前运移。砾石沿斜坡沉积后,海底底流或洋流作用对未固结或弱固结的砾屑灰岩进行溶蚀、改造,最终形成了层面形态特征不同的2类似瘤状碳酸盐岩重力流沉积。

(3) 灰泥丘块体异地搬运至附近的台缘斜坡后,由于地震风暴、沉积层失稳以及重力因素等,岩块继续沿斜坡发生短距离滑动,并最终与似瘤状砾屑灰岩共同沉积,形成角砾型碳酸盐岩重力流沉积,其支撑机制主要为基质强度和分散压力。

**致谢:** 论文在修改过程中得到了西南石油大学地科院陈景山教授和董兆雄教授的宝贵意见和建议,西南石油大学地科院赵敬松副教授为论文提供了镜下薄片鉴定支持,在此一并表示感谢!同时,感谢审稿人提出的宝贵意见。

## 参考文献(References):

- 陈志明. 1991. 扬子地区早古生代碳酸盐重力流沉积的地质背景探讨[J]. 地质科学, 4: 337-345.
- 高振中, 段太中. 1985. 湘西黔东寒武纪深水碳酸盐重力流沉积[J]. 沉积学报, 3(3): 7-22.
- 韩作振, 陈吉涛, 张晓蕾, 等. 2009. 鲁西寒武系第三统张夏组附枝菌与附枝菌微生物灰岩特征研究[J]. 地质学报, 83(8): 1097-1103.
- 郭建华, 高振中, 工正允, 等. 1997. 鄂东南大沙坪下奥陶统碳酸盐岩重力流及自发振动成因机理[J]. 岩石学报, 13 (2): 245-253.
- 靳学斌, 李壮福, 陆鹿, 等. 2014. 下扬子巢湖地区下三叠统瘤状灰岩成因再探讨[J]. 高校地质学报, 20(3): 445-453.
- 李皎, 何登发. 2014. 四川盆地及邻区寒武纪古地理与构造—沉积环境演化[J]. 古地理学报, 16(4): 441-460.
- 李相博, 卫平生, 刘化清, 等. 2013. 浅谈沉积物重力流分类与深水沉积模式[J]. 地质论评, 59(4): 607-614.
- 刘宝裙, 叶红专, 蒲心纯. 1990. 黔东、湘西寒武纪碳酸盐岩重力流沉积[J]. 石油与天然气地质, 11 (3): 235-246.
- 刘登忠, 魏显贵, 杜思清, 等. 1997. 米仓山西段地质研究新进展[J]. 矿物岩石, 17: 1-8.
- 牟传龙, 梁薇, 周昱昱, 等. 2012. 中上扬子地区早寒武世(纽芬兰世—第二世)岩相古地理[J]. 沉积与特提斯地质, 32(3): 41-53.
- 牛新生, 王成善. 2010. 异地碳酸盐岩块体与碳酸盐岩重力流沉积研究及展望[J]. 古地理学报, 12(1): 17-30.

- 沈骋, 谭秀成, 李凌, 等. 2015. 川北早寒武世碳酸盐岩台缘斜坡沉积特征及变形构造形成机制探讨[J]. 古地理学报, 17(3): 321-334.
- 沈骋, 谭秀成, 周博, 等. 2016. 川北旺苍唐家河剖面仙女洞组灰泥丘沉积特征及造丘环境分析[J]. 地质论评, 62(1): 1-14.
- 王一刚. 1986. 黔南桂西早三叠世大陆斜坡碳酸盐岩重力流沉积[J]. 沉积学报, 4(2): 91-100.
- 张满郎, 谢增业, 李熙喆, 等. 2010. 四川盆地寒武纪岩相古地理特征[J]. 沉积学报, 28(1): 128-139.
- 张廷山, 兰光志, 沈昭国, 等. 2005. 大巴山, 米仓山南缘早寒武世礁滩发育特征[J]. 天然气地球科学, 16(6): 710-714.
- 朱洪发, 王恕一. 1992. 苏南、皖南三叠纪瘤状灰岩、蠕虫状灰岩的成因[J]. 石油实验地质, 14(4): 454-460.
- Bouma A H. 1962. Sedimentology of some flysch deposits [J]. Amsterdam: Elsevier Pub.: 168.
- Coniglio M and Dix G R. 1992. Carbonate Slopes [M]// Facies Models: Response to Sea Level Change. Edited by Walker R G and James N P. Geological Association of Canada, St. John's: 349-374.
- Khan K and Al-Shayea N A. 2000. Effect of specimen geometry and testing method on mixed mode I-II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 33(3): 179-206.
- Kuenen Ph H and Migliorini C I. 1950. Turbidity currents as a cause of graded bedding [J]. Journal of geology, 58: 91-127
- Mutti E. 1977. Distinctive thin-bedded turbidite facies and related depositional environments in the Eocene Hecho Group (southcentral Pyrenees Spain) [J]. Sedimentology, 24: 107-131.
- Normark W R. 1978. Fan valleys channels and depositional lobes on modern submarine fans characters for recognition of sandy turbidite environments [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 62: 912-931.
- Shanmugam G. 1996. High-density turbidity currents; are they sandy debris flows? [J]. Journal of Sedimentary Research, 66(1): 2-10.
- Shanmugam G. 2000. 50 years of the turbidite paradigm (1950s-1990s): deep-water processes and facies models—a critical perspective [J]. Marine & Petroleum Geology, 17(2): 285-342.
- Shanmugam G. 2006. Deep-Water processes and facies models: Implications for Sandstone Petroleum Reservoirs [M]. Amsterdam: Elsevier: Handbook of Petroleum Exploration and Production, 5: 476.
- Shanmugam G. 2013. New perspectives on deep-water sandstones: Implications [J]. Petroleum Exploration & Development, 40(3): 316-324.
- Vail P R, Audemard F and Bowman S A, et al. 1991. The Stratigraphic Signatures of Tectonics, Eustacy and Sedimentology: An overview [M]// Einsele G, Ricken W, Seilacher A, eds. Cycles and Events in Stratigraphy. Berlin: Springer-Verlag: 618-659.
- Walker R G. 1978. Deep-water sandstone facies and ancient submarine fans: Models for exploration for Stratigraphic Traps [J]. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 62: 932- 966.