

文章编号: 1000-0550(2017)01-0010-14

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.01.002

冲积扇研究现状及沉积模拟实验 ——以碎屑流和辫状河共同控制的冲积扇为例

印森林¹, 刘忠保², 陈燕辉³, 吴小军³

1. 长江大学录井技术与工程研究院, 湖北荆州 434023

2. 长江大学地球科学学院, 武汉 430100

3. 中国石油新疆油田分公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

摘要 近年来,对冲积扇复杂沉积机制与沉积过程的研究受到关注,取得了较大进展。从冲积扇的分类及其沉积特点、冲积扇沉积储层构型表征方法及冲积扇沉积机制等方面对冲积扇研究现状进行了详细综述。之后,针对碎屑流与辫状河共同控制下冲积扇水道演化机制不明的情况,利用水槽沉积模拟对冲积扇过程进行了沉积实验模拟。研究表明,冲积扇具有多种分类方案,反映了冲积扇的多样性和复杂性;冲积扇表征技术主要有现代沉积、野外露头、地下密井网解剖和水槽沉积实验模拟等方法;控制冲积扇发育的异旋回因素主要有:构造差异活动、同生断层的组合样式及物源气候的变化等;自旋回因素控制下冲积扇存在多种沉积机制,其决定了冲积扇内部构型单元的分布。通过水槽沉积模拟实验研究发现,对碎屑流与辫状河共同控制下冲积扇沉积过程具有如下特点:①在扇体初始雏形形成后,水携沉积物具有向扇面低势部位堆积的趋势;②扇面辫状水道存在两种重要的迁移方式,单一主水道迁移和分叉式次水道迁移方式。单一主水道的迁移是导致扇体辐向前积增大的主要原因,而分叉式次水道迁移方式是扇体展宽的重要机制;③在构造条件相对稳定的情况下,多期扇体具有明显向源退积的特征。在前述研究基础上,探讨了下一步冲积扇的研究方向。

关键词 冲积扇;研究现状;水槽沉积模拟实验;储层构型;同生断层

第一作者简介 印森林,男,1983年出生,博士,副教授,储层沉积学与油气田开发地质,E-mail:yinxiang_love@qq.com

中图分类号 P618.13 **文献标识码** A

0 引言

“洪积扇”或“冲积扇”,为河(洪)流出山口的扇形堆积体。与陆上其他成因的碎屑沉积体相比,冲积扇不同级次沉积体的形态、规模、方向及相互叠置关系十分复杂^[1-8]。自 Drew^[9] 提出描述山口处扇形堆积体的地貌现象—冲积扇(Alluvial Fan)的概念后,冲积扇受到地貌学家和沉积学家的广泛关注^[10-21]。一方面,随着冲积扇与资源环境及人类活动日益密切,有关冲积扇发育的气候、地貌、地形的研究取得了较大的进展,Bull^[11] 率先提出了识别冲积扇的十个特征,继而学者们探讨了冲积扇发育的地形地貌特点^[18-22]。另一方面,冲积扇沉积体具有构造“敏感性”,其复杂的沉积机制既是解释盆地边缘构造活动的钥匙,同时也是“源—聚—汇”系统中“源”位研究的关键。冲积扇还可以作为油气储集体,形成典型的粗碎屑油气藏。其储层岩石相类型多样,至少包括砾

岩相、砂砾岩相、小砾岩相、粗砂岩相、中—细砂岩相、粉砂岩相、泥质砂岩相、泥岩相等八种基本岩石相类型^[23-24],不同岩石相类型其颗粒分选、颗粒含量、排列方式、杂基含量、胶结物胶结方式及胶结物含量具有明显差异性,因此各类岩石相还可以进一步细分亚类,这导致了其孔隙结构模态(包括孔隙、喉道类型及其连通关系等方面)的微观复杂性,加大了冲积扇油气储层勘探开发的难度^[25-27]。

冲积扇成因机制的研究由来已久,初步认为构造活动、气候变化、物源供给及基准面变化是冲积扇形成的重要异旋回因素,其中构造活动是形成冲积扇的决定性因素,气候变化、物源供给及基准面变化是其形成后的重要改造因素^[28-30]。构造活动为冲积扇形成前奠定了地形条件,持续的构造活动则为冲积扇的发展建设提供保证^[1],其直接表现形式主要为盆山板块的相对运动和不同动力机制下断层不同组合样式的差异活动,以此为基础,学者们提出了构造控制

收稿日期: 2015-12-29; 收修改稿日期: 2016-03-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41502126,41372116);长江大学青年基金项目(2015cqn55) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41502126, 41372116;The Yangtze Youth Fund, No. 2015cqn55]

下冲积扇的地形地貌特征、冲积扇沉积层岩石相类型及其组合模式^[23]、冲积扇内部隔夹层分布特征^[5]及冲积扇的相带分布规律^[31]等一系列学术观点。学者们利用沉积学理论开展冲积扇自旋回因素控制下内部构型要素的沉积成因及其沉积过程,探讨了泥石流沉积、水道沉积、筛状沉积及片流沉积特点^[6-10,29]。

作为盆地边缘重要的油气储集体类型,其内部不同级次储集体与渗流屏障的空间分布也十分复杂^[32-34]。已有主要从现代沉积、野外露头、地下密井网及沉积模拟实验等方面对冲积扇进行了研究,取得了一系列的进展,包括从不同类型冲积扇相带的命名及其分布、冲积扇沉积微相类型、冲积扇砂砾岩体岩石相的类型及其成因、冲积扇水道沉积特征、冲积扇不同相带储层构型模式及冲积扇储层孔隙结构复杂模态等方面。综上,探讨冲积扇研究现状,对于深化冲积扇沉积学,探讨构造与沉积的耦合关系,评价油气储层内部差异性并指导油气精细勘探和开发具有重要的理论和实际意义。

1 冲积扇的分类及其沉积特点

冲积扇的分类主要有按气候、按相层序和按沉积机制划分三种方案^[35-40]。Galloway *et al.*^[41]依据气候条件差异,将冲积扇划分为干旱型与湿润型两种类型,突出了气候因素对冲积扇沉积特征的控制作用。赵澄林等^[31]对这两种类型冲积扇的沉积特征进行了对比。分析表明,这两种类型冲积扇在河流的性质、地形坡度、扇体半径、河床分布格局、沉积物分布以及垂向序列等方面具有明显的差异。

按照冲积扇的相序和沉积序列,冲积扇可分为进积型、退积型和加积型等类型^[31]。进积型冲积扇的地层厚度向上变厚,粒度变粗。而退积型冲积扇正好相反,地层厚度向上变薄,粒度变细。进积型冲积扇物源供给速度大于可容空间增长的速度,形成自下而上扇缘、扇中、扇根依次叠置的相层序,因此沉积物粒度向上变粗。而退积型冲积扇与进积型冲积扇相反,物源供给速度小于可容空间增长的速度,因此,自下而上扇根、扇中、扇缘依次叠置,沉积物粒度向上变细。加积型则物源供给速度与可容空间增长的速度相等,地层厚度、粒度变化不明显^①。

传统认为冲积扇的沉积类型主要为泥石流(碎屑)和辫状河沉积物。Stanistreet *et al.*^[42]在研究非洲

南部 Okavango 冲积扇时提出了曲流河(或直流河)控制的冲积扇类型,扩展了冲积扇的定义,提出了冲积扇三端元分类方案。三个端元分别为:泥石流(碎屑流)沉积为主的冲积扇、辫状河沉积为主的冲积扇和曲流河(或直流河)沉积为主的冲积扇。

2 冲积扇沉积储层构型表征方法

由于冲积扇与人类活动的紧密联系,对冲积扇的地形地貌研究由来已久,而油气勘探发现冲积扇油气储层之后,其为典型的粗碎屑沉积体系,冲积扇储层构型成为研究的热难点。Hornung *et al.*^[43]通过浅层地震研究的方法对瑞士阿尔卑斯山的一洪积扇沉积特征及气候对沉积的控制作用进行了研究。Sadura *et al.*^[44]通过探地雷达对洪积扇的内部结构进行了研究,精度可以达到识别出扇体上水道的级别。除了上述两种新的方法为,目前应用较多的方法主要有以下三种。

2.1 现代沉积与野外露头

冲积扇沉积体与河流—三角洲沉积体对比来说,它属于“源—聚—汇”体系的“源”位,冲积扇广泛发育在盆地边缘。正因如此,冲积扇的研究源于现代沉积与野外露头。利用野外露头、现代沉积,初步建立了冲积扇岩石相及其组合类型、冲积扇构型级次的定义、冲积扇的差异性、冲积扇的构型模式等等。然而,由于冲积扇类型及沉积机制复杂,现代沉积与野外露头出露具有局限性^[45]。

2.2 地下密井网

冲积扇沉积体具有无序性,其储层表征难度比河流—三角洲大。目前针对冲积扇储层的表征,于兴河等^[6]、伊振林等^[3]、吴胜和等^[4]、印森林等^[5]主要从岩石相及其组合的成因、构型要素、构型要素的级次,不同级次储集体及泥质隔夹层的叠置关系等多个方面开展。冲积扇地下储层的表征方法包括“层次分析、模式拟合、多维互动及动态验证”,业已初步建立了干旱型冲积扇沉积储层构型模式,与此同时,初步提出了基于矢量的冲积扇沉积体三维地质建模算法^[46]。然而,因为地下储层表征受井间资料精度限制,具有不确定性,因此地下冲积扇构型模式的研究具有局限性。

2.3 水槽沉积模拟实验

利用现代沉积、野外露头及地下密井网研究均不能很好的揭示冲积扇的沉积过程,而冲积扇不同类型

① 张纪易. 粗碎屑洪积扇沉积模式. 新疆石油管理局勘探开发研究院. 1981. 内部报告.

的沉积机制成为研究的难点。因此,利用水槽实验模拟不同粒度的冲积扇沉积体可以对冲积扇沉积过程进行研究。Pelletie *et al.*^[47]利用有色染料作为沉积物载体进行冲积扇形成过程的模拟实验,分析了冲积扇发育的过程。染色剂的分布位于冲积扇的一部分,认为扇面上水道是变迁的。Clarke *et al.*^[48]通过试验装置对冲积扇沉积过程进行了详细的模拟研究。实验研究了冲积扇形成的过程、扇面水道迁移的规律、新水道的产生过程、扇面水流形态等。研究认为,辫状河型冲积扇在扇面不是均匀分布的,而只是占据扇面的一部分,选择低势区分布,并且低势能区不停地发生迁移改变,从而导致了扇面水道的迁移。因为冲积扇与不同构造活动盆地的关系,Graveleau *et al.*^[49]实验模拟了挤压性、拉张性及走滑性盆地背景下同生断层活动与扇体的耦合关系,提出了不同背景下冲积扇的发育样式及其特点。虽然水槽沉积模拟实验在冲积扇流体机制方面研究取得了重要的成果;然而,因冲积扇大多属于粗碎屑沉积类型,其实验室边界条件的设置存在较大的局限性,例如,对于粒度较大、泥质含量较高、沉积范围较大的冲积扇模拟就存在难度;另一方面,冲积扇沉积物源供给具有阵发性、突发性的特点,实验室很难精确的掌握这种阵发性及突发性的时间间隔,因而模拟过程中的放水过程难以把握。

3 冲积扇沉积机制的研究现状

冲积扇的形成过程和沉积特征受诸多异旋回与自旋回因素的影响,其中以构造、源区岩性、气候和地形等因素尤为重要,而构造因素是最根本的因素。它既直接影响着冲积扇的建设,又间接的通过其他因素影响冲积扇的发展建设。

3.1 异旋回因素对冲积扇的控制

异旋回因素包括了多个方面,包括构造活动、同生断层的活动组合方式、物源以及气候的变化等。

(1) 构造差异活动对冲积扇的控制

冲积扇发育在构造盆地和褶皱山系相互联系相对独立的构造单元的结合部位,这些部位构造活动强度和频繁程度比盆内大的多。因此,冲积扇可以说是构造活动的产物,另一方面,当地构造活动的变化将敏感地在冲积扇沉积物中体现出来。构造因素应当包括冲积扇形成前的构造发展史和冲积扇形成时的构造运动特点两个方面。前者主要通过其他因素间接地对冲积扇施加影响,后者则更多地表现为直接影响。冲积扇形成过程中,源区和沉积区可能出现4种构造方式^①(图1)。

从构造发展史来分析,假如源区构造活动强烈,必然急剧抬升而形成高山大岭,断裂和褶皱使岩石变

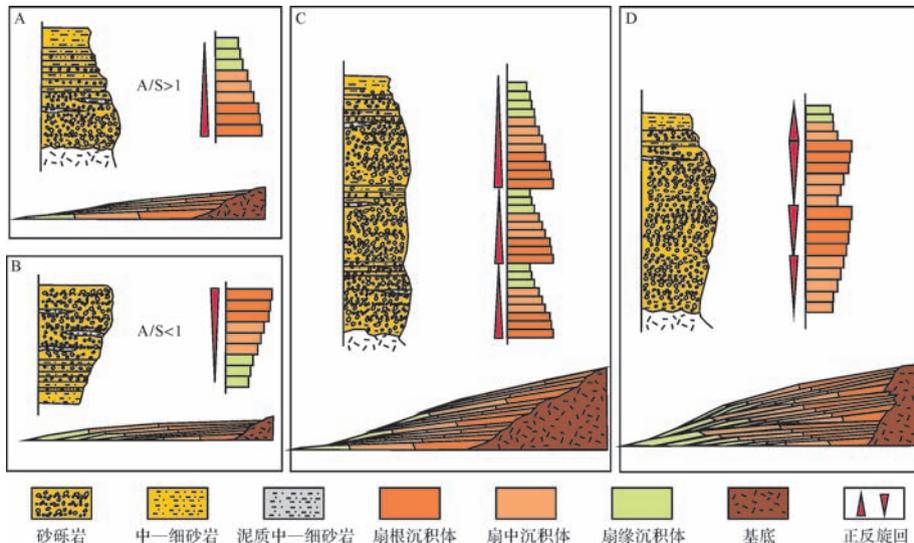


图1 物源区和沉积区不同构造样式对冲积扇的控制(据张纪易,1981修改)

A.源区上升沉积区下降或者两者同时沉降,则形成简单的退积型冲积扇;B.源区和沉积区同时抬升,则形成由扇缘过渡到扇根亚相的进积式冲积扇;C.沉积区沉降和源区的抬升具有间歇性,复杂的叠覆式冲积扇;D.源区和沉积区间歇抬升,形成嵌套式冲积扇。

Fig.1 Alluvial fan lithologic sequence controlled by different structure patterns of provenance and deposition area (modified from Zhang, 1986)

①张纪易.粗碎屑洪积扇沉积模式,新疆石油管理局勘探开发研究院,1981,内部报告.

形破碎易于风化搬运,源区与沉积区高差大,导致山区河流坡降大、V形谷发育,水系汇流面积扩展快。山区河流多属于间歇性河流,气温变化引起的水循环活跃,多暴雨洪水。这种情况下形成的冲积扇扇体清晰,扇积物厚度大。砾石成分复杂,磨圆度较好,容易形成单层系大型交错层理。扇缘亚相发育。微相带特征明显,扇根主槽,侧缘槽切割较深,扇中辫流水道规模较大。

相反,假如扇体形成前源区构造活动不活跃,则外力地质作用使源区向山丘陵演变,沉积区和源区间高差小,山区河流坡降小,截面宽浅,只有暂时性水流。暴雨的频度和雨量都较小。因此,低山丘陵区的冲积扇扇体形态不清,呈漫坡状,扇体厚度小,常与山麓面共存。岩性一般较为单纯,粗碎屑均呈角砾状,少见大型交错层理。扇缘亚相不发育,微相带不易区分,扇面沟槽浅、规模小。

构造发展史与源区岩性也有关系,如源区长期处于抬升过程中,则地表裸露岩石多属于古老变质岩及岩浆岩,因而具有较大的脆性,有利于形成粗碎屑冲积扇。假如源区在冲积扇形成前曾一度沉降,则往往存在成岩程度差的砂泥质沉积岩,冲积扇剖面上就不同程度地混有泥石流沉积物。

(2) 同生断层活动样式对冲积扇的控制

冲积扇的活动与构造运动相伴生,冲积扇的发展壮大与同生断层具有重要的关系。不同的同生断层活动样式对冲积扇具有明显的控制作用。已有研究表明,在正梳状断层组合样式下,走滑活动导致物源区不断剥蚀后退,扇体呈退积薄层条带状溯源叠置状。直接导致了冲积扇的垂向砂砾岩体厚度薄,平面呈快速退积式的特点。在反梳状断层组合样式下,右

旋调节断裂走滑活动会影响物源出口位置,扇体呈侧向迁移叠置型;多期次不同级次的幕式挤压抬升造成了砂砾岩体的复杂叠置关系。走滑断裂的活动改变了物源的方向,使得扇体呈侧向迁移叠置型样式。在“人”字形组合样式下,断层活动强烈,扇体多期厚层垂向叠置状;“人”字形的顶部为供源的主要通道,为两山的交接处,在强烈的断层活动条件下提供的丰富物源决定了其控制下巨厚大规模的扇体^[30](图2)。

另一方面,同生逆断层上盘地层受到不同程度的挤压而逐渐隆起,因断层分布的非对称性及地层不同位置岩性受压能力的差异性形成了不对称的隆起背斜形态(正牵引构造)^[50]。由其引起的差异隆起的沉积底形决定了砂砾岩体的分布样式。引起了冲积扇砂砾岩体构型要素在空间上分布与已有冲积扇沉积模式差异较大,即不再满足辐向距扇根部位距离相等的位置具有大体相同的构型属性的规律(图3)。

(3) 物源与气候变化

冲积扇物源供给对于冲积扇类型以及其沉积机制具有重要的影响和控制作用。冲积扇的物源供给与气候变化具有相关性。当物源一定,如果山区经常暴雨,则山口易形成大规模的冲积沉积体;而如果山区少雨,则物源不易被搬运出口。另一方面,物源差异条件下,冲积扇的沉积机制则会发生变化,Stanistreet *et al.*^[4]研究 Okavango 冲积扇时,发现当物源中泥质含量较多的时候,则易形成碎屑流、泥石流控制的冲积扇,泥石流发育程度高,当物源中砂砾岩含量较高时则易形成辫状河控制的冲积扇,形成以牵引流沉积机制的为主的扇体;当物源中以砂泥质为主时,则易形成曲流河控制的冲积扇,扇体一般发育在气候比较湿润的地区,形成面积较大的冲积扇^[51-53]。

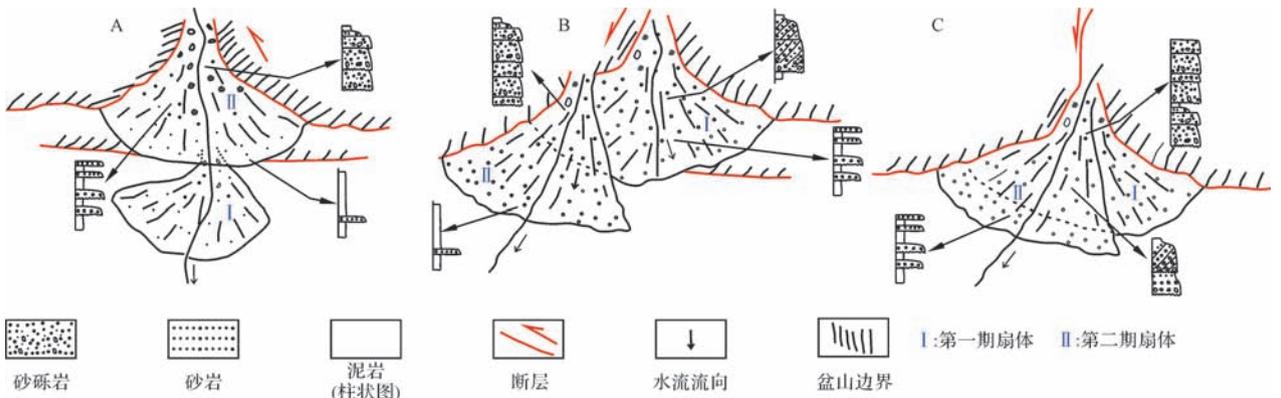


图2 同沉积断层组合样式控制下扇体展布样式

A. 正梳状断裂组合样式; B. 反梳状断裂组合样式; C. 交叉状断层组合样式

Fig.2 Different alluvial fan patterns controlled by combined styles of contemporaneous reverse fault

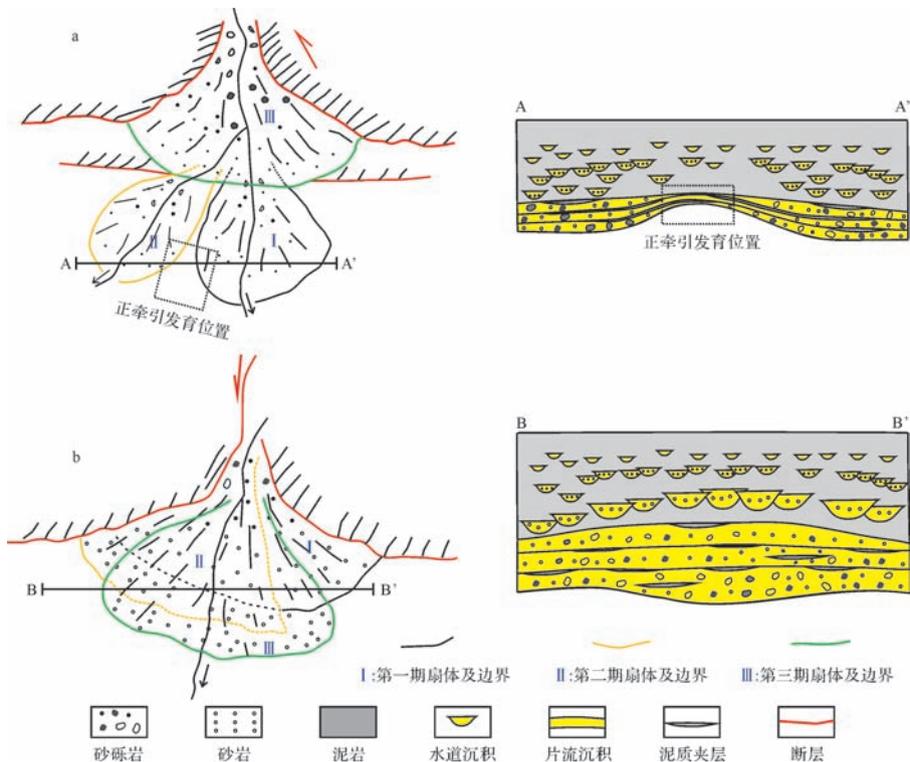


图3 冲积扇构型差异特征

a.正牵引构造控制下冲积扇构型特征;b.正常冲积扇构型特征

Fig.3 Different deposition architecture of alluvial fan

气候条件对扇体的形成也具有较大的影响, Ori^[52] 研究润湿型 River Reno 冲积扇时, 提出湿润性气候条件下, 降水频率大, 水量丰沛, 水流比较稳定。Partha^[53] 提出了冲积扇在大范围暴雨控制下扇体的迁移转化特点, 出山口河流形成的冲积扇规模大, 组成物质分选较好, 砾石磨圆度高, 扇面水道发育程度高。在湿热气候作用下, 泥岩呈现红壤化。半湿润气候条件下, 出山口河流在山前多发育大面积的冲积扇。如中国华北平原西部山前的永定河等冲积扇, 表面形态扁平, 坡度较小, 形成广阔的冲积扇平原。干旱区气候条件下, Evans^[54]、Harvey^[55]、Chakraborty *et al.*^[56]、Hubert *et al.*^[57] 指出冲积扇和泥石流发育的特点及其共存时的差异沉积机制, 降雨量极少, 暂时性洪流在山麓谷口处形成冲积扇。组成冲积扇的泥砂砾, 颗粒粗大, 磨圆度差, 层理不明显, 扇面网状水系发育不显著。在山前断裂活动的盆地, 冲积扇具有很大的沉积厚度, 紧靠山前部分通常厚度达数百米, 冲积扇从扇根到扇缘的高差也可达数百米。

3.2 自旋回因素对冲积扇沉积过程的影响

冲积扇为近源沉积体, 与河流和三角洲牵引流沉积相比沉积特征复杂, 其内部自旋回因素的控制则其

沉积过程, 既有牵引流沉积, 也有重力流沉积。国内外学者对冲积扇内部的沉积类型进行了大量的研究。

Hooke^[58-59]、Carter^[60] 详细地描述了泥石流的沉积过程。泥石流沉积物以砂、泥、砾混杂为特征, 无分选或分选极差, 呈块状, 杂基支撑, 常见巨大的碎屑物“漂浮”于细粒的杂基之中形成“漂砾”。Levson *et al.*^[35] 将冲积扇内发育的分选差、碎屑支撑, 砂砾混杂、块状堆积的岩石相解释为低黏性的泥石流(碎屑流)沉积(Noncohesive debris flow)。它与之前描述的泥石流沉积不同, 其沉积物中泥质含量少, 为碎屑支撑机制。而之前描述的杂基支撑泥石流沉积为高黏度的泥石流沉积, 低黏度泥石流(碎屑流)沉积的外部形态呈席状或低起伏的坝。

湿润型冲积扇中, 主体为河道充填的沉积物。在干旱型冲积扇中, 河道的沉积物主要分布在冲积扇的中上部位, 其交会点之后, 洪水不受河道的束缚, 形成漫流沉积^[55]。冲积扇不同位置河道的类型也有较大的差别^[52]。

Wasson^[61] 描述了筛状沉积砾石堆体的形成过程, 指出筛状沉积的砾石体在交会点处河道的中央形成障碍, 后期的片流经过这个障碍发生分叉。

Hooke^[59]分析了死谷中戈拉克谢普冲积扇中筛状沉积的分布特征,认为筛状沉积成因为洪水负载中缺少细粒沉积物,在靠近交会点下面时,古水流遇到高渗的沉积物,迅速渗漏,水流减小或者不能形成地表的水流,阻止了粗碎屑继续搬运,象筛子一样将粗碎屑留下来,形成筛状沉积。筛状沉积比较少见,形成于特殊的沉积环境,其物源区一般为解理发育的石英岩类岩石,它是冲积扇中最有特色的沉积类型。

片流(Sheetflood)位于冲积扇的末端或者河道的交会点的下段,由黏度较低的洪水形成^[62]。洪水从冲积扇河床的末端流出,流速变缓而且水深骤然变浅,沉积物以席状或者片状沉积下来,形成席状的砂或砾岩层,称为片流沉积或者漫洪沉积、漫流沉积。最早“片流”用做泥石流的同义词^[31]。片流逐渐演化为浅的坡面径流,退化形成辫流水道的形式。河道切割片流席状沉积物的表面,形成分选好的砂和砾石透镜体。片流的沉积物主要由碎屑组成,也可含有少量的粉砂和黏土,常呈块状(图4)。

关于片流的定义和描述长期以来比较模糊、不明确(例如片流的位置),主要原因在于冲积扇特征差

异较大,而长期以来对冲积扇类型的划分不完善,给冲积扇特征规律的总结带来了困难。传统定义的片流出现在冲积扇末端和河道的下段,粒度比河道沉积物细。然而,有些学者对于片流岩石相特征及其分布规律有不同的认知,认为其岩石相可以为粒度较粗的砾岩,并具有平行层理,分布范围可以在冲积扇的近端或几乎全部区域。

冲积扇一般包括其中一种或几种自旋回产生的沉积类型。各种沉积在冲积扇中的分布位置与所占的比例也因冲积扇沉积环境不同而有较大的差异。泥石流沉积一般分布在扇顶附近,筛状沉积分布在河道交汇点之下,河道沉积主要位于扇中交会点以上,片流沉积分布在河道交汇点以下及扇顶附近。

4 冲积扇沉积过程实验模拟

目前,对碎屑流与辫状河共同控制下的干旱型粗碎屑冲积扇来说,其形成的沉积物具有粒度粗、多沉积机制共存、多因素控制等典型特征。而自旋回控制下辫状水道的演化和冲积扇的加积过程研究较少,因此本次在综合调研基础上,利用水槽沉积模拟实验来

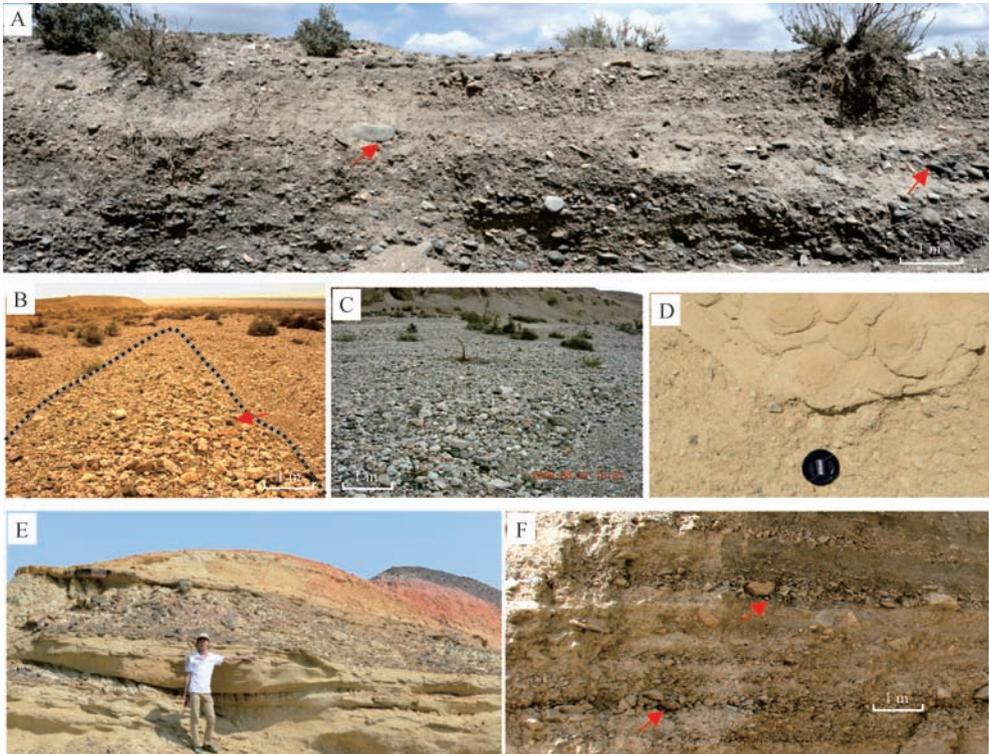


图4 冲积扇内部多种水流机制

A.泥石流沉积,砂砾泥混杂堆积,砾石大小不一,最大粒径达0.6 m,新疆百口泉白杨河第四纪现代冲积扇;B,C.筛状沉积,筛积物呈舌状堆积的砾石层,粒度中间粗两边细,新疆天山南缘第四纪现代冲积扇;D,E.大型槽状交错层理与砂砾质辫状水道,新疆克拉玛依深底沟三叠系下克拉玛依组冲积扇露头, T_2k_2 ;F.片流沉积形成的多层洪积层理,界面清晰夹层发育程度低,新疆第四纪现代冲积扇。

Fig.4 Variety of water flow mechanism inside of alluvial fan

探索不同水道机制的演化过程及其规律。

4.1 装置规模及控制系统

中国石油天然气集团公司油气储层长江大学沉积模拟重点实验室实验装置,长 16 m,宽 6 m,深 0.8 m,距地平面高 2.2 m,湖盆前部设进(出)水口 1 个,两侧各设进(出)水口 2 个,用于模拟复合沉积体系,尾部设出(进)水口一个。湖盆四周设环形水道(图 5)。

4.2 边界条件设置及水槽沉积模拟

利用水槽沉积实验室分期模拟冲积扇阵发性形成机制和特点。实验装置设计,实验底形采用约 8° 的斜坡,斜坡长度约 1 m,整个底形坡面上利用水泥稳固;实验采用颗粒物质的配比(砾:砂:泥)分别是 4L:2L:2L,通过清水搅拌后,混合物约 200 L;整个过程采用均匀放水的方式,上游持续放水,下游水携沉积物沉积。实验分为四期,每期沉积物配比及水量不变;实验时间每次约 7 分钟(第四期因放水速度减缓约 12 分钟)(图 6)。

4.3 水槽沉积模拟实验结果分析

4.3.1 切片方式及剖面分析

经过水槽沉积模拟试验后,放置一段时间(3 天),待扇体内部水分充分流出并晾干后,对整个剖面开展切片工作,研究其剖面展布特征,以弥补平面研究的不足。按照模拟晾干后扇体的分布,设计了不同的横纵剖面共 26 条,其中横切扇体剖面 20 条,纵切扇体剖面 6 条,横剖面长度 0.5 m、0.8 m、1 m,纵剖面长度 0.5 m、0.3 m。因切片块不能重复,因此横纵剖面存在顺序性。具体顺序如下:横 01、横 02、纵 01、横 03、横 04、横 05、纵 02、横 06、横 07、纵 03、横 08、横 09、横 10、纵 04、横 11、横 12、纵 05、横 13、横 14、横 15、纵 06、横 16、横 17、横 18、横 19、横 20 (图 7)。

剖面不同区域其特征存在较大的差异,从靠近扇根部位到扇缘,剖面形态及构型特征存在较大的不同。扇根部位整体以砂砾岩为主,水道的规模较小、分叉较少,约 0.08m 左右,其形态较直,弯度偏小。

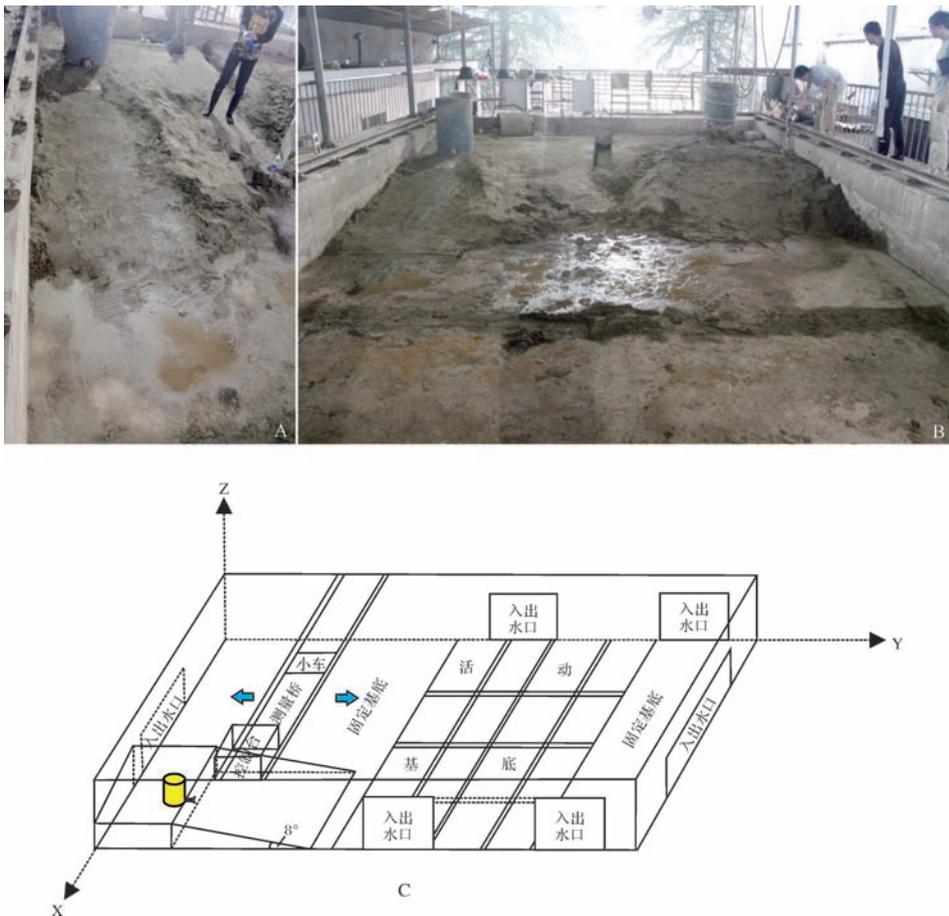


图 5 水槽实验模拟冲积扇边界条件设置

A.底形设计;B.不同底型模拟多个冲积扇;C.水槽模拟实验装置示意图

Fig.5 Boundary conditions settings about flume experimental simulation on alluvial fan

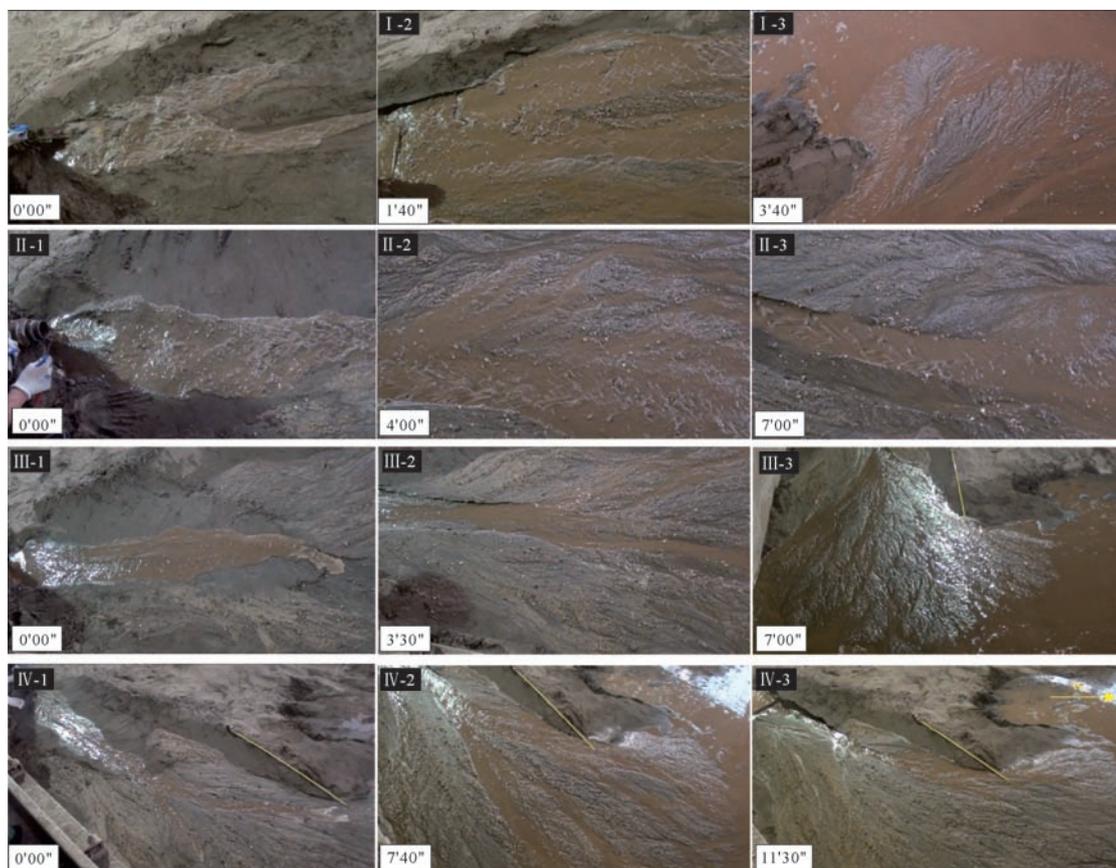


图6 水槽实验模拟冲积扇沉积过程

Fig.6 Flume experiment simulation on alluvial fan sedimentary process

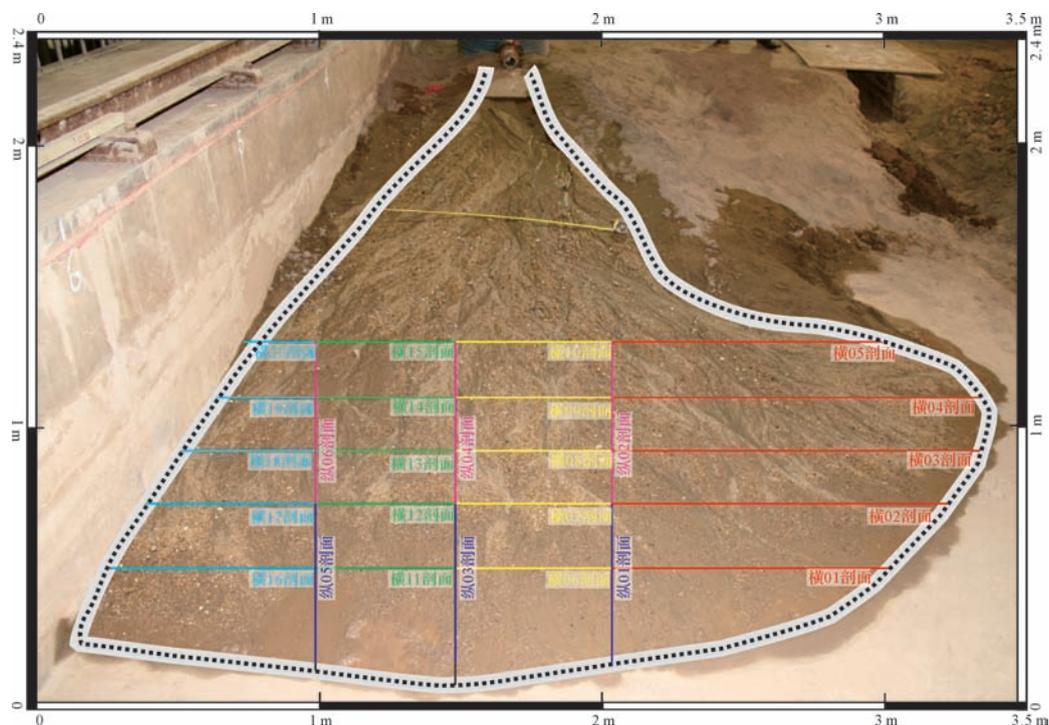


图7 扇体剖面线位置图

Fig.7 Transverse and vertical section line of alluvial fan deposit

扇中部位砂砾岩体的厚度增加,其中砂砾岩的含量有所减小,水道规模对比扇根略有增加,形态则变得弯曲,曲率增加,水道数量增多,规模略大。扇缘部位以砂岩为主,砾岩的分布也很广泛(与实验条件有关),水道规模对比扇中略有减小,曲率减小,水道数量增多(图 8)。

水槽模拟实验中,砾岩的含量变化具有重要的特点。模拟四期冲积扇扇面的砾岩从根部到边缘均发育,砾岩从根部到边缘发育程度逐渐下降,然而局部砾岩的发育具有随机性,不同部位均沉积了砾岩。在水道发育位置以砂岩为主,水道之间形成的坝体均以砂砾岩为主。

晾干后,剖面及平面分析发现泥岩含量较少,主要原因在于快速推进的水体不易于泥质细粒沉积物的沉积。另一方面,高水流速度以及砾、砂、泥的配比决定了泥质沉积物难以沉积在扇体的主体部位,这也是碎屑流沉积的重要特点。

4.3.2 水槽沉积模拟实验总结

水槽实验模拟冲积扇沉积过程中,在扇体初始雏

形形成后,水携沉积物具有向扇面低部位堆积的趋势,导致了单一期次扇体具有迁移摆动叠置特征。水携沉积物首先在坡下正前方迅速沉积散开;随着沉积物的堆积,形成了中部的高地,即扇体初始雏形;随后,水携沉积物以此为基础在其侧翼散开堆积,当沉积物到一定高度后,水携沉积物则迅速向沉积体另一低部位迁移并沉积下来;在不断的迁移摆动中,形成了单一期次冲积扇。另外,多期扇体具有明显向源退积的特征。通过四期实验发现前一期扇体形成后,扇面整体呈中间厚、四周薄的形态特征,中间厚的部位往往位于放水口的正前方。在后期扇体形成的过程中便形成了隆起底形,导致后期沉积物在前期厚的位置自然向源退积(图 9)。

扇体发育受自旋回因素控制另一个重要方面就是扇面水道迁移的方式。扇面水道存在两种重要的迁移方式,单一主水道迁移和分叉式多次水道迁移方式。单一主水道的迁移是扇体前积的重要沉积特点,也是扇体初始沉积的主要方式。水携沉积物从物源出口处迅速出来,沉积物沉积后,主水道开始分叉。

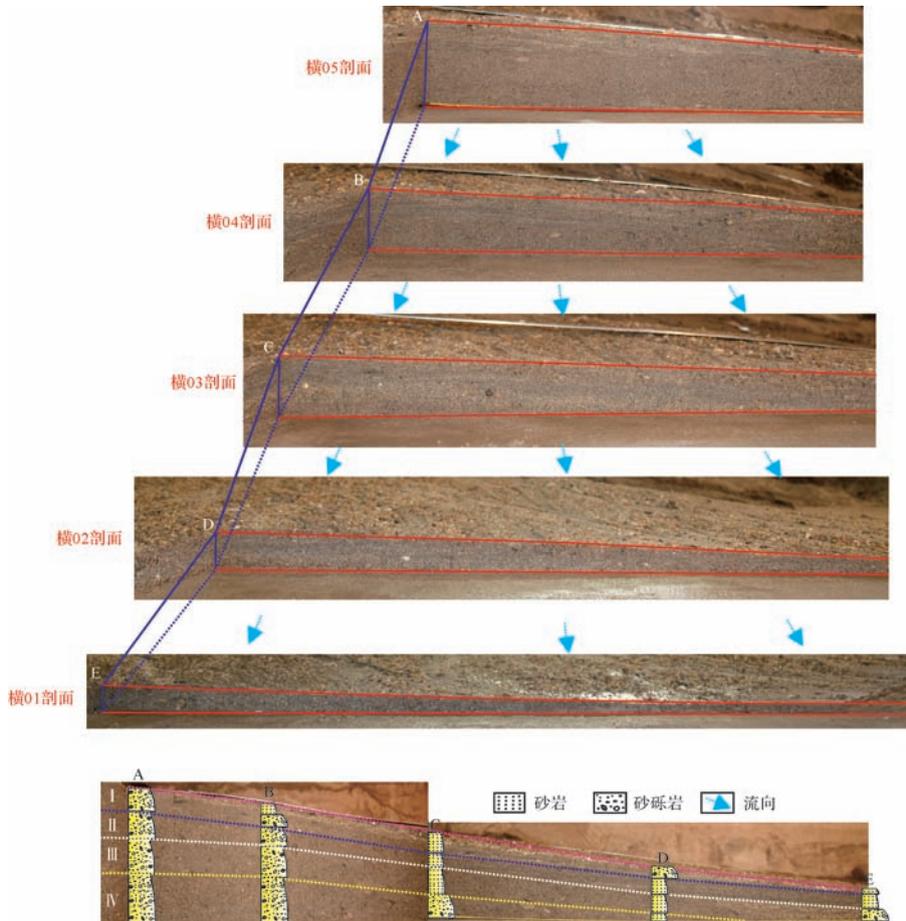


图 8 冲积扇沉积体剖面演化过程

Fig.8 Evolution profile from root fan to marginal fan



图9 冲积扇沉积体迁移演化特征

A.第I期扇体模拟;B.第II期扇体模拟;C.第III期扇体模拟;D.第IV期扇体模拟;E.第I期扇体模拟完后边界;F.第II期扇体模拟结束后边界;G.第III期扇体模拟结束后边界;H.第IV期扇体模拟结束后边界。

Fig.9 Evolution and migration characteristics of alluvial fan body

之后,扇体以分叉式次水道迁移方式开始各向加积,呈扇体逐渐横向展宽的特点。一段时间后,扇面沉积物的达到相对平衡状态,此时扇体开始重新转向单一主水道的迁移方式向前快速加积,扇体辐向长度增加。这是扇体发育壮大的两种重要方式(图10)。单一主水道的迁移是扇体辐向前积增大的方式,而分叉式次水道迁移方式是扇体展宽的重要机制。

沉积过程反映了扇体自身的沉积作用规律, Lucy Clarke *et al.* [48] 提出了扇面沉积物加积及水道变化过程,扇面早期以片状加积为主(Sheetflow dominated),然后变为1~2个主水道(One or two main channel),随后进一步演化为单一水道(Single Channel)的过程。本次实验进一步探索了不同样式的水道加积过程中冲积扇的加积、冲积扇规模变化及多期扇体叠置特点,具体如下:①在扇体初始锥形形成后,水携沉积物具有向扇面低部位堆积的趋势,导致了单一期次扇体具有迁移摆动叠置特征。②扇面水道存在两种重

要的迁移方式,单一主水道迁移和分叉式次水道迁移方式。单一主水道的迁移是扇体辐向前积增大方式,而分叉式多次水道迁移方式是扇体展宽的重要机制;③在构造稳定的条件下,多期扇体具有明显向源退积的特征。

5 冲积扇研究展望与讨论

通过上述分析与水槽沉积实验模拟,冲积扇在以下几个方面亟待进一步深入研究:

(1) 不同类型盆地边缘冲积扇的成因及其差异模式,深入的探讨不同动力学机制下冲积扇的发育特征。挤压型盆地边缘、拉张型盆地边缘及走滑性盆地边缘冲积扇的沉积成因及构型差异性特征;一方面,区域性构造环境的差异是引起不同冲积扇的根本原因;另一方面,构造的幕式运动形成的多期次冲积扇沉积体是解释构造动力学机制的重要手段。因此,盆地边缘的构造动力学与冲积扇沉积学关系的研究将

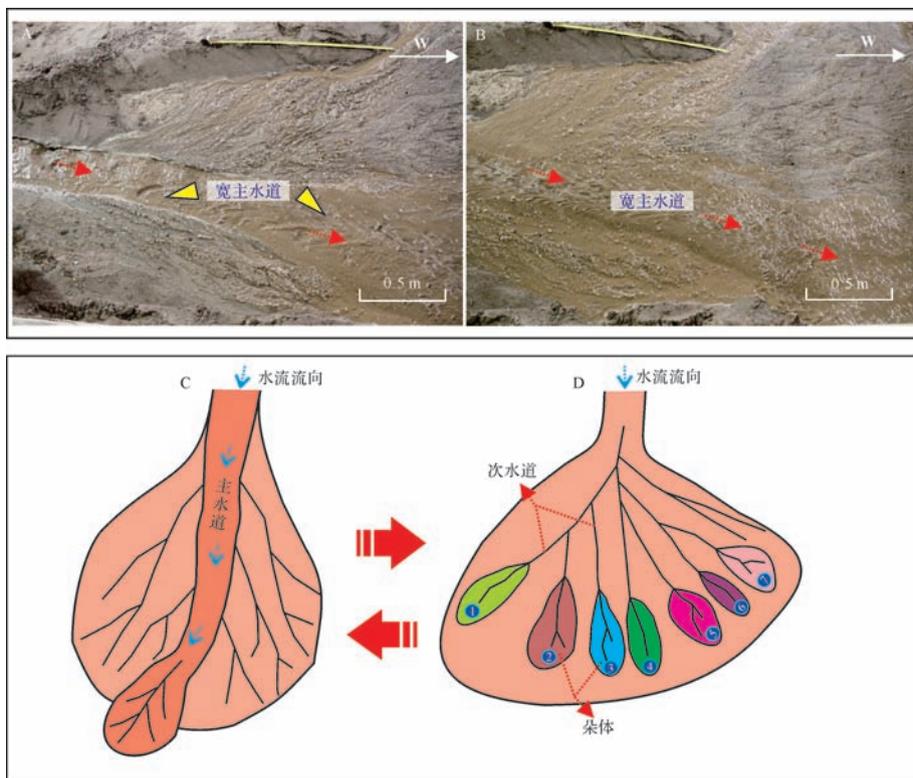


图10 扇体水道与朵体的迁移演化特征

A.一条宽主水道;B.多条宽主水道;C.主水道控制下扇体的长度增大;D.多条次水道控制下扇体宽度增大

Fig.10 Evolution and migration characteristics of alluvial fan channel and lobe

越来越重要。

(2) 同一盆地边缘发育的不同类型冲积扇的差异性,包括干旱型冲积扇、润湿性冲积扇、高泥质冲积扇、巨粒型冲积扇等。不同类型的冲积扇除受控于局部的构造变化外,其与气候、物源供给关系及其密切。物源的供给丰富程度改变了冲积扇沉积体的 A/S 比值,是揭示冲积扇内部韵律旋回的关键要素。而气候的变化导致了冲积扇发育地区的水动力学机制的变化,干旱地区山洪暴发一般比较猛烈频繁,时间比较短,属于间歇性水流,则易形成厚度大、范围广的粗碎屑沉积体;润湿性气候条件,山洪暴发相对缓和,属于不间断水流,一般形成源远流长型辫状河控制冲积扇。这些差异性可以通过研究冲积扇内部构型要素的不同来解释。因此,研究同一盆地边缘发育的不同类型冲积扇的差异性可以探索自旋回因素对异旋回的响应机理。

(3) 冲积扇内部多水流机制的成因及其转换过程,其内部的泥石流、碎屑流、牵引流等各种流态的差异性是重要的科学问题。不同的水动力学机制的研究是沉积学的基本问题。冲积扇内部的水流机制既

有从扇根到扇缘的泥石流、碎屑流、牵引流的变化,同时,在单一相带内,侧向上也存在这种变化。本文水槽沉积模拟实验探讨了辫状水流机制的变化及其差异性,虽然初步的解释了两种水道转换过程中扇体的加积变化过程,然而因为实验条件(粒度、水流强度、水流速度等)与地下情况存在较大的差异,不能尽显其过程。因此,冲积扇不同部位流态的变化过程及其特点的研究显得特别重要,是解答目前与冲积扇相关的学术争议的关键。

对冲积扇复杂沉积机制的探索具有挑战性。冲积扇沉积体成因及其分布模式的研究不仅对沉积学的发展具有重要的理论意义;同时,对揭示构造控制下沉积体的响应过程具有重要的指导意义。

致谢 感谢审稿专家的宝贵意见!

参考文献(References)

- [1] 张纪易. 克拉玛依洪积扇粗碎屑储集体[J]. 新疆石油地质, 1980, 1(2): 33-53. [Zhang Jiayi. Karamay alluvial coarse clastic reservoir[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1980, 1(2): 33-53.]
- [2] 张纪易. 粗碎屑洪积扇的某些沉积特征和微相划分[J]. 沉积学报, 1985, 3(3): 75-85. [Zhang Jiayi. Some depositional characteris-

- tics and microfacies subdivision of coarse elastic alluvial fans[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1985, 3(3): 75-85.]
- [3] 伊振林, 吴胜和, 杜庆龙, 等. 冲积扇储层构型精细解剖方法——以克拉玛依油田六中区下克拉玛依组为例[J]. *吉林大学学报:地球科学版*, 2010, 40(4): 939-946. [Yi Zhenlin, Wu Shenghe, Du Qinglong, et al. An accurate anatomizing method for structure of reservoir of alluvial fan; A case study on Lower Karamay Formation, Liuzhong area, Karamay oilfield[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2010, 40(4): 939-946.]
- [4] 吴胜和, 范峥, 许长福, 等. 新疆克拉玛依油田三叠系克下组冲积扇内部构型[J]. *古地理学报*, 2012, 14(3): 331-340. [Wu Shenghe, Fan Zheng, Xu Changfu, et al. Internal architecture of alluvial fan in the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay oilfield, Xinjiang[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(3): 331-340.]
- [5] 印森林, 吴胜和, 冯文杰, 等. 冲积扇储集层内部隔夹层样式——以克拉玛依油田一中区克下组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(6): 757-763. [Yin Senlin, Wu Shenghe, Feng Wenjie, et al. Patterns of inter-layers in the alluvial fan reservoirs: A case study on Triassic Lower Karamay Formation, Yizhong area, Karamay oilfield, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2013, 40(6): 757-763.]
- [6] 于兴河, 瞿建华, 谭程鹏, 等. 玛湖凹陷百口泉组扇三角洲砾岩岩相及成因模式[J]. *新疆石油地质*, 2014, 35(6): 619-627. [Yu Xinghe, Qu Jianhua, Tan Chengpeng, et al. Conglomerate lithofacies and origin models of fan deltas of Baikouquan Formation in Mahu sag, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2014, 35(6): 619-627.]
- [7] 余宽宏, 金振奎, 李桂仔, 等. 准噶尔盆地克拉玛依油田三叠系克下组洪积砾岩特征及洪积扇演化[J]. *古地理学报*, 2015, 17(2): 143-159. [Yu Kuanhong, Jin Zhenkui, Li Guizai, et al. Conglomerate characteristics and alluvial fan evolution of the Triassic Lower Karamay Formation in Karamay oilfield, Junggar Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(2): 143-159.]
- [8] 吴因业, 冯荣昌, 岳婷, 等. 浙江中西部永康盆地及金衢盆地白垩系冲积扇特征[J]. *古地理学报*, 2015, 17(2): 160-171. [Wu Yinye, Feng Rongchang, Yue Ting, et al. Characteristics of the Cretaceous alluvial fans in Yongkang and Jinqu Basins, central and western Zhejiang province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2015, 17(2): 160-171.]
- [9] Drew F. Alluvial and lacustrine deposits and glacial records of the upper-Indus basin[J]. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 1873, 29(1/2): 441-471.
- [10] Bull W B. Relation of textural (CM) patterns to depositional environment of alluvial-fan deposits[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1962, 32(2): 211-216.
- [11] Bull W B. Geomorphology of segmented alluvial fans in western Fresno county, California[J]. *Geology Society America Bulletin*, 1964, 70: 89-129.
- [12] Bull W B. Recognition of alluvial-fan deposits in the stratigraphic record[C]//Rigby J K, Hamblin W K. Recognition of Ancient Sedimentary Environments. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, Special Publication, 1972, 16(1): 63-83.
- [13] Bull W B. The alluvial-fan environment[J]. *Progress in Physical Geography*, 1977, 1(2): 222-270.
- [14] Al-Sulaimi J S, Pitty A F. Origin and depositional model of Wadi Al-Batin and its associated alluvial fan, Saudi Arabia and Kuwait[J]. *Sedimentary Geology*, 1995, 97(3/4): 203-229.
- [15] Blair T C. Sedimentary processes and facies of the waterlaid Anvil Spring Canyon alluvial fan, Death Valley, California[J]. *Sedimentology*, 1999, 46(5): 913-940.
- [16] Blair T C. Sedimentology and progressive tectonic unconformities of the sheetflood-dominated Hell's Gate alluvial fan, Death Valley, California[J]. *Sedimentary Geology*, 2000, 132(3/4): 233-262.
- [17] Chamyal L S, Khadkikar A S, Malik J N, et al. Sedimentology of the Narmada alluvial fan, western India[J]. *Sedimentary Geology*, 1997, 107(3/4): 263-279.
- [18] 李新坡, 莫多闻, 朱忠礼, 等. 一个片流过程控制的冲积扇——太原盆地风峪沟冲积扇[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 2007, 43(4): 560-566. [Li Xinpo, Mo Duowen, Zhu Zhongli, et al. A sheetflood-dominated alluvial fan—FengYG alluvial fan, Taiyuan Basin[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2007, 43(4): 560-566.]
- [19] 莫多闻, 朱忠礼, 万林义. 贺兰山东麓冲积扇发育特征[J]. *北京大学学报:自然科学版*, 1999, 35(6): 816-823. [Mo Duowen, Zhu Zhongli, Wan Linyi. The alluvial fans along the eastern foot of Helan Mountain[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1999, 35(6): 816-823.]
- [20] DeCelles P G, Gray M B, Ridgway K D, et al. Controls on synorogenic alluvial-fan architecture, Beartooth Conglomerate (Palaeocene), Wyoming and Montana[J]. *Sedimentology*, 1991, 38(4): 567-590.
- [21] Spalletti L A, Piñol F C. From alluvial fan to playa: an upper Jurassic ephemeral fluvial system, Neuquén Basin, Argentina[J]. *Gondwana Research*, 2005, 8(3): 363-383.
- [22] 王勇, 钟建华, 王志坤, 等. 柴达木盆地西北缘现代冲积扇沉积特征及石油地质意义[J]. *地质论评*, 2007, 53(6): 791-796. [Wang Yong, Zhong Jianhua, Wang Zhikun, et al. Sedimentary characteristics of modern alluvial fans in the northwest margin of the Qaidam Basin and their significance in petroleum geology[J]. *Geological Review*, 2007, 53(6): 791-796.]
- [23] 郑占, 吴胜和, 许长福, 等. 克拉玛依油田六区克下组冲积扇岩石相及储层质量差异[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(4): 463-471. [Zheng Zhan, Wu Shenghe, Xu Changfu, et al. Lithofacies and reservoirs of alluvial fan in the Lower Karamay Formation in the block-6 of Karamay oilfield, the Junggar Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(4): 463-471.]
- [24] 印森林, 胡张明, 郑丽君, 等. 第四纪昌平冲积扇沉积特征研究[J]. *中国科技论文*, 2015, 10(15): 1828-1833. [Yin Senlin, Hu Zhangming, Zheng Lijun, et al. Sedimentary features of the Quaternary Changping alluvial fan[J]. *China Sciencepaper*, 2015, 10(15): 1828-1833.]

- [25] Clarke R H. Reservoir properties of conglomerates and conglomeratic sandstones: geologic notes[J]. AAPG Bulletin, 1979, 63(5): 799-803.
- [26] 刘敬奎. 砾岩储层结构模态及储层评价探讨[J]. 石油勘探与开发, 1983, 10(2): 45-56. [Liu Jingkui. An investigation on structure model of conglomeratic reservoir and its evaluation[J]. Petroleum Exploration and Development, 1983, 10(2): 45-56.]
- [27] 刘敬奎. 克拉玛依油田砾岩储集层的研究[J]. 石油学报, 1986, 7(1): 39-50. [Liu Jingkui. A study of the thick conglomeritic reservoirs in the Kelamayi oil field[J]. Acta Petrolei Sinica, 1986, 7(1): 39-50.]
- [28] Jones S J, Arzani N, Allen M B. Tectonic and climatic controls on fan systems: the Kohrud mountain belt, Central Iran[J]. Sedimentary Geology, 2014, 302: 29-43.
- [29] Leeder M R. Tectonic sedimentology: sediment systems deciphering global to local tectonics[J]. Sedimentology, 2011, 58(1): 2-56.
- [30] 印森林, 吴胜和, 李俊飞, 等. 同生逆断层正牵引构造对高频层序地层结构及沉积充填的控制作用[J]. 地质论评, 2014, 60(2): 310-320. [Yin Senlin, Wu Shenghe, Li Junfei, et al. The controlling effect on high frequency sequence stratigraphic architecture and depositional filling by normal drag structure caused by contemporaneous reverse fault[J]. Geological Review, 2014, 60(2): 310-320.]
- [31] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学[M]. 3版. 北京: 石油工业出版社, 2001. [Zhao Chenglin, Zhu Xiaomin. Sedimentary Petrology[M]. 3rd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001.]
- [32] 焦巧平, 高建, 侯加根, 等. 洪积扇相砂砾岩体储层构型研究方法探讨[J]. 地质科技情报, 2009, 28(6): 57-63. [Jiao Qiaoping, Gao Jian, Hou Jiagen, et al. Reservoir architecture of multiplex glutenite on alluvial fan[J]. Geological Science and Technology Information, 2009, 28(6): 57-63.]
- [33] 宋子齐, 杨立雷, 程英, 等. 非均质砾岩储层综合评价方法——以克拉玛依油田七中、东区砾岩储层为例[J]. 石油实验地质, 2007, 29(4): 415-419, 425. [Song Ziqi, Yang Lilei, Cheng Ying, et al. Comprehensive evaluation of heterogeneity conglomerate reservoirs——Taking conglomerate reservoirs in Qizhong and Qidong area of Karamay oil field as an example[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(4): 415-419, 425.]
- [34] 王振彪, 裴亦楠. 大港枣园油田冲积扇储层研究[J]. 石油勘探与开发, 1991, 18(4): 86-92. [Wang Zhenbiao, Qiu Yanan. A study of Zaoyuan alluvial fan reservoir, Dagang oilfield[J]. Petroleum Exploration and Development, 1991, 18(4): 86-92.]
- [35] Levson V M, Rutter N W. Influence of bedrock geology on sedimentation in Pre-Late Wisconsinan alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains[J]. Quaternary International, 2000, 68-71: 133-146.
- [36] Jackson L E Jr, Hungr O, Gardner J S, et al. Cathedral Mountain debris flows, Canada[J]. Bulletin of the International Association of Engineering Geology, 1989, 40(1): 35-54.
- [37] Larsen V, Steel R J. The sedimentary history of a debris-flow dominated, Devonian alluvial fan—a study of textural inversion[J]. Sedimentology, 1978, 25(1): 37-59.
- [38] Bürgisser H M. 1984. A unique mass flow marker bed in a Miocene streamflow molasse sequence, Switzerland[C]//Koster E H, Steel R J. Sedimentology of Gravels and Conglomerates. Alberta, Canada, Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 1984, 10: 147-163.
- [39] Massari F, Mellere D, Doglioni C. Cyclicality in non-marine foreland-basin sedimentary fill; the Messinian conglomerate-bearing succession of the Venetian Alps (Italy) [M]//Marzo M, Puigdefábregas C. Alluvial Sedimentation. London, England, The International Association of Sedimentologists, 1993: 501-520.
- [40] Brierley G J, Liu Keyu, Crook K A W. Sedimentology of coarse-grained alluvial fans in the Markham Valley, Papua New Guinea[J]. Sedimentary Geology, 1993, 86(3/4): 297-324.
- [41] Galloway W E, Hobday D K. Terrigenous Clastic Depositional Systems: Applications to Petroleum, Coal, and Uranium Exploration [M]. New York: Springer, 1983, 97: 270-296.
- [42] Stanistreet I G, McCarthy T S. The Okavango fan and the classification of subaerial fan systems[J]. Sedimentary Geology, 1993, 85(1/2/3/4): 115-133.
- [43] Hornung J, Pflanz D, Hechler A, et al. 3-D architecture, depositional patterns and climate triggered sediment fluxes of an Alpine alluvial fan (Samedan, Switzerland)[J]. Geomorphology, 2010, 115(3/4): 202-214.
- [44] Sadura S, Martini I P, Endres A L. Morphology and GPR stratigraphy of a frontal part of an end moraine of the Laurentide Ice Sheet: Paris Moraine near Guelph, ON, Canada[J]. Geomorphology, 2006, 75(1/2): 212-225.
- [45] 贾爱林, 穆龙新, 陈亮, 等. 扇三角洲储层露头精细研究方法[J]. 石油学报, 2000, 21(4): 105-108. [Jia Ailin, Mu Longxin, Chen Liang, et al. Approach for detailed study on reservoir outcrop[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 105-108.]
- [46] 冯文杰, 吴胜和, 印森林, 等. 基于矢量信息的多点地质统计学算法[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2014, 45(4): 1261-1268. [Feng Wenjie, Wu Shenghe, Yin Senlin, et al. A vector information based multiple-point geostatistic method[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2014, 45(4): 1261-1268.]
- [47] Pelletier J D, DeLong S B, Cline M L, et al. Dispersion of channel-sediment contaminants in distributary fluvial systems: application to fluvial tephra and radionuclide redistribution following a potential volcanic eruption at Yucca Mountain[J]. Geomorphology, 2008, 94(1/2): 226-246.
- [48] Clarke L, Quine T A, Nicholas A. An experimental investigation of autogenic behaviour during alluvial fan evolution[J]. Geomorphology, 2010, 115(3/4): 278-285.
- [49] Graveleau F, Strak S, Dominguez S, et al. Experimental modelling of tectonics-erosion-sedimentation interactions in compressional, extensional, and strike-slip settings[J]. Geomorphology, 2015, 244: 146-168.
- [50] 王宁国. 正牵引构造及其找油意义[J]. 石油与天然气地质,

- 1981, 2(3): 265-275. [Wang Ningguo. Normal drag structure and its significance in oil prospecting[J]. *Oil & Gas Geology*, 1981, 2(3): 265-275.]
- [51] Shukla U K, Singh I B, Sharma M, et al. A model of alluvial megafan sedimentation: Ganga Megafan[J]. *Sedimentary Geology*, 2001, 144(3/4): 243-262.
- [52] Ori G G. Braided to meandering channel patterns in humid-region alluvial fan deposits, River Reno, Po Plain (northern Italy)[J]. *Sedimentary Geology*, 1982, 31(3/4): 231-249.
- [53] Partha P C, Ashish S, Kaushik D, et al. Alluvial fan to storm-dominated shelf transition in the Mesoproterozoic Singhara Group, Chattisgarh Supergroup, Central India[J]. *Precambrian Research* 1, 2009, 70: 88-106.
- [54] Evans J E. Facies relationships, alluvial architecture, and paleo-hydrology of a Paleogene, humid-tropical alluvial-fan system; Chumstick formation, Washington State, U.S.A. [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1991, 61(5): 732-755.
- [55] Harvey A M. The coupling status of alluvial fans and debris cones: a review and synthesis [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(1): 64-76.
- [56] Chakraborty P P, Sarkar A, Das K, et al. Alluvial fan to storm-
- dominated shelf transition in the Mesoproterozoic Singhara Group, Chattisgarh Supergroup, Central India[J]. *Precambrian Research*, 2009, 170(1/2): 88-106.
- [57] Hubert J F, Filipov A J. Debris-flow deposits in alluvial fans on the west flank of the White Mountains, Owens Valley, California, U.S.A. [J]. *Sedimentary Geology*, 1989, 61(3/4): 177-205.
- [58] Hooke R L. Alluvial fans [D]. California: California Institute of Technology, 1965: 1-78.
- [59] Hooke R L. Processes on arid-region alluvial fans [J]. *The Journal of Geology*, 1967, 75(4): 438-460.
- [60] Carter R M. A discussion and classification of subaqueous mass-transport with particular application to grain-flow, slurry-flow, and fluxoturbidites [J]. *Earth-Science Reviews*, 1975, 11(2): 145-177.
- [61] Wasson R J. Intersection point deposition on alluvial fans: an Australian example [J]. *Geografiska Annaler Series A, Physical Geography*, 1974, 56(1/2): 83-92.
- [62] Spearing D R. Summary Sheets of Sedimentary Deposits with Bibliographies, Geological Society of America Map and Chart Series, MC-8 [M]. Boulder: Geological Society of America, 1974.

Research Progress and Sedimentation Experiment Simulation about Alluvial Fan: A case study on alluvial fan controlled by debris flow and braided river

YIN SenLin¹, LIU ZhongBao², CHEN YanHui³, WU XiaoJun³

1. Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China

2. College of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 430100, China

3. Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, Karamay, Xinjiang 834000, China

Abstract: In recent years, it has widespread attention about study of the alluvial fan complex deposition mechanism and sedimentary process. Alluvial fan correlational research has made great improvement. This paper is summarized in details about alluvial fan classification and sedimentary characteristics, alluvial fan reservoir architecture characterization, and mechanism of alluvial fan formation. Later, the experimental simulation of the alluvial fan deposition process is carried out by using the experimental of flume sedimentation simulation. Research shows that: (1) Alluvial fan has a variety of classification schemes that reflects the diversity and complexity of alluvial fan. There are many methods to characterize alluvial fan, mainly includes modern sedimentation survey and outcrop, underground dense well pattern, and experimental of flume sedimentation simulation, and so on. Controlling alluvial fan development allogenic cycle factors mainly include difference activity of tectonic, styles of contemporaneous fault combination, climate and provenance source change etc.; There are many kinds of autogenetic cycle factors under the control of alluvial fan depositional mechanism that determines the distribution of alluvial fan internal architecture unit. (2) Alluvial fan sedimentary process has following features. Firstly, after the initial prototype fan body formation, water laden sediments has trend to deposit on low lying position. Secondly, there are two important ways of channel migration, a single main channel migration and minor branched channel migration. A main reason of fan body to increase the length caused by a single main channel migration, while the important mechanism of the fan body width increases being minor branched channel migration. Multi-period fan body obvious retrograded overlying pattern of up-dipping towards the provenance with stable tectonic conditions. Finally, on the basis of the foregoing, the next research direction was discussed.

Key words: alluvial fan; research progress; experimental of flume sedimentation simulation; reservoir architecture; contemporaneous reverse fault