

## 冲决:河道演化关键环节的综述与讨论

陈薪凯,周树勋,辛红刚,李成,李卫成,冯胜斌,毛振华,朱立文,李弛,殷亮亮

引用本文:

陈薪凯,周树勋,辛红刚,李成,李卫成,冯胜斌,毛振华,朱立文,李弛,殷亮亮.冲决:河道演化关键环节的综述与讨论[J].沉 积学报,2023,41(5):1311-1328.

CHEN XinKai, ZHOU ShuXun, XIN HongGang, et al. Avulsion: A Review and Discussion of Key Points in Channel Evolution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2023, 41(5): 1311-1328.

#### 相似文章推荐(请使用火狐或IE浏览器查看文章)

#### Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

## 主要构型要素细分下的曲流河单砂体识别

Identifying Single Sand Bodies in Meandering River Deposits Based on Subdivision of Main Architecture Elements 沉积学报. 2020, 38(1): 205-217 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.011

#### 基于地貌形态学交融的现代曲流河道迁移构型表征

Geomorphology Processes of Channel Planform Migration on Modern Me–andering Rivers 沉积学报. 2018, 36(3): 427–445 https://doi.org/10.14027/j.issn.1000–0550.2018.045

#### 高弯度曲流河砂体规模定量表征研究

Quantitative Characterization Study on Sand Body Scale in High Sinuosity Meandering River 沉积学报. 2017, 35(2): 279–289 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.02.007

### 从端点走向连续:河流沉积模式研究进展述评

From End Member to Continuum: Review of fluvial facies model research 沉积学报. 2017, 35(5): 926–944 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.006

曲流河道沉积演化过程与历史重建——以吉林油田扶余采油厂杨大城子油层为例

Evolution Process and Historical Reconstruction of Meandering River: An example from Fuyu oil reservoir of Yangdachengzi Oil Production Plant in Jilin Oilfield

沉积学报. 2015, 33(3): 448-458 https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2015.03.003

文章编号:1000-0550(2023)05-1311-18

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2022.125

# 冲决:河道演化关键环节的综述与讨论

陈薪凯<sup>1,2</sup>,周树勋<sup>1,2</sup>,辛红刚<sup>1,2</sup>,李成<sup>1,2</sup>,李卫成<sup>1,2</sup>,冯胜斌<sup>1,2</sup>,毛振华<sup>1,2</sup>,朱立文<sup>1,2</sup>, 李弛<sup>1,2</sup>,殷亮亮<sup>1,2</sup>

1.低渗透油气田勘探开发国家工程实验室,西安 710018
 2.中国石油长庆油田公司勘探开发研究院,西安 710018

**摘 要** 有关冲决的研究已充分应用于地质学、地貌学、水工学等领域,但尚未受到国内沉积学家的充分重视。在梳理相关争 议性问题的基础上,综述并讨论有关冲决概念、成因、演化、识别、应用等关键问题。主要成果包括:(1)阐述冲决的概念,以及冲 决与决口、改道的异同,并建议使用狭义的冲决概念来解释大规模的河道改道;(2)明确坡度比是冲决的主要控制因素,天然堤 的抗冲性(砂质天然堤还是泥质天然堤)、泛滥平原的地貌特征(地表植被,水位,排水状况,废弃河道)是河道冲决的次要控制因 素;(3)总结了冲决的演化模式与识别标准,提出了适用于储层沉积学的分类方案;建议国内的沉积学家使用决口型冲决与废弃 河道再占用型冲决识别不同的河道类型与演化方式,或使用地层过渡型冲决与地层突变型冲决的分类方案来区分河道之间的 叠置关系;(4)讨论了冲决在储层构型、河型转化等当前热点问题中的应用前景。建议引入冲决的概念来完善储层构型领域5级 构型的演变、大型河道化体系的地质知识库的建立,以及异旋回对储层构型的影响;补充河型转化当中大型单一河道与网状化 河道相互转化的沉积模式。有关冲决问题的综述与讨论为储层沉积学家恢复古河道演化方式,建立更加精准的地质模型提供 更多的科学依据。

关键词 冲决;河道演化;决口扇;储层构型;砂体叠置;河型转化;曲流河;改道

**第一作者简介** 陈薪凯,男,1990年出生,博士研究生,工程师,油藏评价综合研究,E-mail: chenxk\_cq@petrochina.com.cn 通信作者 周树勋,男,高级工程师,油藏评价,E-mail: zsx\_cq@petrochina.com.cn

中图分类号 P512.2 文献标志码 A

# 0 引言

冲决一词在英文中为 avulsion,后推广应用于有 关河道研究的诸多领域。有关冲决的研究成果有助 于地貌学家探索冲积平原上地貌的形成与演化,有 利于沉积学家重建古河道的历史演变、有益于水利 工程师控制城市河道流体的走向<sup>[1]</sup>。在沉积学领域, 河流在洪泛期的决口与冲决,驱使流体与沉积物进 人泛滥平原,并促使泛滥平原加积或河道演化;冲决 频率、河道迁移速率以及净沉积速率决定了泛滥平 原上河道、废弃河道、越岸沉积的丰度与几何形 态<sup>[26]</sup>。在冲积扇或三角洲沉积当中,冲决促进分流 河道延伸与废弃的不断循环<sup>[7-8]</sup>。

在国外的研究当中,冲决的概念、成因、演化模式、识别方式等诸多环节还存在较多的争议<sup>[1-8]</sup>。首

先,部分学者所提出的冲决概念与决口、改道颇为相 近,有必要阐明冲决的狭义与广义概念,以及使用范 畴。其次,在冲决的控制因素方面,超高、标准化超 高、坡度比等关键参数的影响相近但含义不同,且坡 度比变化、洪水激发、河道阻塞等经典控制因素,正 在受到有关泛滥平原的地形地貌、天然堤的抗冲性 等研究的挑战,有必要对这些控制因素的研究进展 进行对比讨论。第三,在有关冲决的演化模式与识 别方法方面,基于现代沉积的研究主要侧重河道的 演化样式,而基于古代露头的研究则侧重于砂体的 叠置关系,有必要对比前人分类方案与识别方法,为 沉积学家在利用钻井数据、露头数据、地震数据进行 砂体精细刻画时提出相应的识别方案。

此外,有关冲决的研究尚未受到国内沉积学家的足够重视,国内的学者常使用冲裂<sup>10</sup>、冲决<sup>101</sup>、冲裂

收稿日期:2022-08-05;修回日期:2022-10-30;录用日期:2022-11-11;网络出版日期:2022-11-11

基金项目:中国石油天然气股份有限公司"十四五"基础性前瞻性重大科技项目(2021DJ0402)[Foundation: China National Petroleum Corporation's "Fourteenth Five Year Plan" Basic Prospective Major Scientific and Technological Projects, No. 2021DJ0402]

决口<sup>[11]</sup>、改道<sup>[12-13]</sup>等近义词分别阐述大规模的决口改 道事件<sup>[9]</sup>、河道分叉后所形成的废弃河道类型<sup>[10]</sup>、新一 期河道的演化阶段<sup>[11]</sup>、浅水三角洲的改道与改道的破 坏作用<sup>[12-13]</sup>等,但尚未对冲决进行专门的引进与讨 论。有必要在对比讨论国内外有关冲决研究的基础 上对冲决概念、成因、演化、识别、应用等关键问题进 行总结归纳,并结合当前储层构型、河型转化等热点 问题进行讨论,从而为储层沉积学家恢复古河道的 演化方式,建立更加精细的地质模型提供更多的科 学依据。

# 1 冲决的概念

## 1.1 冲决的定义

冲决在英文中为 avulsion,最早起源于医学术 语<sup>114</sup>,在国内的医学领域常被翻译为撕脱或撕裂。在 地质学领域,早期 Allen<sup>115</sup>将冲决定义为河道迁移至 泛滥平原的低洼处导致(冲决点下游)曲流带的突然 废弃。Makaske<sup>116</sup>认为 Allen 对冲决的定义仅仅包含 曲流河,而辫状河中新河道的再次形成与网状河中 分流河道的形成都应该属于冲决的范畴,且新河道 的形成并不一定伴随着现有河道带的突然废弃,因 此以"河道"代替"曲流带",并舍弃"(冲决点)下游河 道的突然废弃",将冲决定义为当前河道中的流体发 生改道(diversion)进入泛滥平原,最终形成新的河道 带。与前人不同的是,Mohrig et al.<sup>111</sup>考虑了废弃河道 的重新占用(reoccupation),并将 avulsion定义为流体 快速流出原先稳定的河道带,并进入相邻泛滥平原 新的流体通道内。

在冲决的定义方面,目前多数学者认为冲决一 词仅限于生成新的河道带,即大规模的改道事件;但 也有部分学者将冲决的概念应用于河道的短期改 道,比如辫状河中河道的迁移或曲流河的截弯取 直<sup>[17-18]</sup>。简而言之,广义的冲决概念可以指代所有河 道化体系的改道现象,但狭义的冲决概念(多数学者 接受的概念)是指流体快速流出原先稳定的河道带, 侵蚀泛滥平原,或占用泛滥平原中的废弃河道,最终 形成新的河道带。鉴于截弯取直、河道废弃等概念 在油藏描述中已经广泛应用,且这些概念在解决单 砂体刻画时有着良好的应用效果<sup>[10,19-21]</sup>,本文推荐使 用冲决的狭义概念,即仅使用冲决一词形容大规模 的河道改道现象。

## 1.2 冲决与决口、改道的异同

## 1.2.1 冲决与改道

冲决是改道(diversion)的近义词,早期Fisk就只 使用改道一词对密西西比河的冲决现象进行描述<sup>[17]</sup>, 国内的水工学家也常使用"改道"一词来形容 avulsion<sup>[22:23]</sup>。Mackey *et al.*<sup>[24]</sup>在冲积地层的模拟中, 使用"河道改道(冲决)"的表达方式对与冲决相关的 内容进行论述。而前人也多使用改道(diversion)一 词对冲决的定义进行说明<sup>[1,15-16]</sup>。鉴于早期冲决的概 念主要应用于大规模的流体改道<sup>[1,15-17]</sup>,狭义的冲决概 念在某种程度上可以作为大规模改道的近义词。但 又因为目前冲决概念在冲积扇、辫状河、泛滥平原 (曲流河和网状河)、三角洲体系等诸多改道事件中 广泛应用<sup>[1,8,25-26]</sup>,很难将广义的冲决概念与改道区分 开来,可以将广义的冲决概念作为改道的近义词。 1.2.2 冲决与决口

多数冲决与决口扇相伴生,因此国内的学者多 使用冲裂决口或冲决来描述与决口相伴生的冲决现 象<sup>[9-11]</sup>。随着主河道中的流体不断汇入决口水道并不 断延伸,此时成长的决口水道可能捕获主河道中的 多数流体甚至全部流体,并最终引发大规模的改道 (冲决)<sup>[27-28]</sup>。无论是现代沉积<sup>[27-28]</sup>,还是古代露头<sup>[29]</sup>, 都可以观察到这一决口水道不断延伸所引发的冲决 现象,而这种与决口扇伴生的冲决类型通常被命名 为决口型冲决或前积型冲决<sup>[17]</sup>。

在区分冲决与决口方面, Nienhuis et al.<sup>[30]</sup>认为如 果决口在短暂的时间内愈合,则不发育冲决,如果决 口水道继续延伸,则可能演化为冲决; Kraus et al.<sup>[29]</sup>认 为,与决口扇相比,冲决覆盖面积更大(冲决可以涵 盖数百平方千米),持续时间更长(冲决通常大于100 年,而决口通常几天到数年),且冲决河道与主河道 (旧河道)大多呈平行或亚平行;而 Makaske et al.<sup>[31]</sup>在 对巴西的西南部、Pantanal 盆地、Taquari 扇体的观察 分析中,则简单地将流体改道超过旧河道满岸流体 50%的称为冲决,反之则称之为决口。

# 2 冲决的成因

冲决的成因(控制因素)有多种,中国历史上黄河的冲决大多由河道淤积与水文洪水引发<sup>[32-33]</sup>;1873年加拿大东Saskatchewan河的大型冲决由河道的冰塞(ice jam)触发<sup>[27-28]</sup>;非洲Okavango扇体的冲决主要由植被的生长引发河道堵塞与堆积所致<sup>[34]</sup>。

在数值模拟当中,Heller et al.<sup>[5]</sup>使用超高(supere levation,即河流满岸的水位高程与相邻泛滥平原最小高程之间的差值)作为衡量冲决的主要因素(图 1);Mackey et al.<sup>[24]</sup>使用横穿河谷的坡度Scv(cross-valley slope)与顺谷河道带坡度Sdv(down-valley channel-belt slope)的比值Scv/Sdv作为河道调整至冲决门限的关键因素;Slingerland et al.<sup>[35]</sup>模拟发现,当决口坡度与顺流坡度比大于5时,河道将产生冲决。坡度的影响可以简单地理解为,当顺流坡度较大时,流体与沉积物倾向于向下游汇聚,因此冲决较少;而当横向坡度较大时,流体与沉积物趋向于溢出天然堤,并进入泛滥平原的低洼处。

Jones et al.<sup>[36]</sup>使用冲决的潜在坡度 Sa(slope of the potential avulsion course)与现有河道坡度Se(the slope of the existing channel)的比值 Sa/Se 作为引发冲 决的关键因素,并将冲决的成因归因于三大类(表1、 图 2):(1)Se下降导致 Sa/Se 增加;(2)Sa 增大导致 Sa/ Se增加;(3)Sa/Se不变,但河道携带流体与沉积物的 能力发生改变。在大多数情况下,这些因素的一部 分可以共同使河流接近冲决门限,随后的触发事件 (主要是洪水)将会导致河流超过冲决门限并产生冲 决。但是使用 Jones 的方案<sup>[36]</sup>需要注意以下几点: (1)Jones 所说的Sa是指冲决的潜在坡度(slope of the potential avulsion course)<sup>[36]</sup>,可以理解为冲决最大趋 势方向的坡度,该方向可能与河道垂直或斜交(注意 与Mackey所说的横穿河谷方向<sup>124</sup>区分, Mackey采用 的是垂直河道的坡度);(2)冲决的触发机制通常是 洪水事件,但河道的冲决并不一定由大型洪水所引 发。当河道调整接近冲决门限时,只需小型的洪水, 即可产生冲决[31];(3) Jones 所说的基准面下降诱发冲 决<sup>130</sup>(在海相体系或海陆过渡相体系中,基准面通常 是指海平面四),是指当海(湖)平面下降时,导致湖底 或者大陆架暴露,此时当河流流入湖底或大陆架时,







随着河道顺流坡度(Se)的降低,导致Sa/Se增加,最终可能导致河道的冲决。这一现象需要与Stouthamer et al.<sup>[38-39]</sup>所强调的基准面(海平面)快速上升促进冲决 相区分,因为Stouthamer et al.<sup>[38-39]</sup>强调的是基准面(海 平面)快速上升导致顺流坡度(Se)急剧下降,从而引 发较高的冲决频率;(4)除坡度比外,Mohrig et al.<sup>[11</sup> 增加标准化超高(normalized superelevation,即超高 与流体深度的比值)作为衡量冲决的第二个重要指 标,认为不同规模的河道体系,其天然堤超高相差 巨大,使用超高与流体深度的比值有利于在对比不 同规模的河道体系时对超高进行标准化处理 (图1)。

超高151、标准化超高111、坡度比124.361等关键参数在 冲决的成因方面广泛应用,并作为冲决前河道不断 调整并接近冲决门限的关键参数,或者被称作冲决 的关键性前置因素。但其重要性也受到部分学者的 挑战。Rajchl et al.<sup>401</sup>探讨了泥炭的差异压实对冲决 的影响,但差异压实的结果仍然是局部坡度的改变。 Aslan et al.[41]认为,密西西比河流域横穿河道与顺河 道的坡度之比为16~100,这些数值远远超过了 Slingerland 数值模拟中的冲决门限<sup>135</sup>,但是下密西西 比河谷中的冲决事件却很少,这一结果表明数值模 拟过程中应当减少对坡度优势(gradient advatages)的 过分强调,增强对其他因素的关注,如泛滥平原的地 形等。Makaske et al.<sup>[31]</sup>对巴西西南部 Taquari 扇体的 观测结果显示,砂质天然堤是中扇区域决口冲决产 生的主要因素之一,应当重视天然堤的抗冲性。 Nienhuis et al.<sup>[30]</sup>通过数值模拟,认为植被促进沉积物 在泛滥平原中沉积,并减少侵蚀作用,没有植被覆盖 的泛滥平原更容易产生冲决。

随着露头调研与数值模拟的不断深入,坡度变 化(包括海平面升降、构造变化、天然堤加积、泛滥平 原加积、差异压实、河道的延伸与侧向加积对坡度比 的改变)<sup>[1,5,17,24,31,35-36,38-39]</sup>、天然堤的抗冲性(砂质天然堤 还是泥质天然堤)<sup>[31,41]</sup>、泛滥平原地貌(地表植被、水 位、排水状况、废弃河道)<sup>[1,30-31,40-41]</sup>均可以作为影响冲 决的前置因素,在这些因素的综合作用下,河道不断 调整并接近冲决门限,并在一定的触发机制(洪水、 构造运动、河道堵塞等)下产生冲决。但每种研究手 段各有利弊,在探究冲决的成因方面,现代沉积的观 察最为真实,但大型冲决的时间跨度少则数十年多 则数千年,很难观察到冲决的整个环节;数值模拟可

## 表1 冲决的成因(据 Jones et al.<sup>[36]</sup>)

#### Table 1 Cause of avulsion (after Jones et al. [36])

激发河道冲决的过程及事件			河道携带沉积物
			及泄洪的能力
	a.河道弯度增大(曲流河)	否	降低
类型一:	b.三角洲生长(河道延伸)	否	降低
Sa/Se增加(Sa不变,Se减少)导致的冲决	c.基准面下降(坡度下降)	否	降低
	d.构造隆升(导致隆升处顺流坡度下降)	是	降低
	a. 天然堤/冲积脊增长	否	不变
尖型二:	b. 冲积扇或三角洲生长	否	不变
Sa/Se增加(Sa增加,Se不变)寻致的冲获	c.构造作用(导致河道侧向倾斜)	是	不变
	a.洪峰流量的变化	是	降低
¥2. mil →	b.沉积物从支流涌入,输沙量增加,岩体垮塌,风积作用	是	降低
尖型二:	c.植被堵塞	否	降低
Sa/Se不受寻致的冲伏	d.木塞	是	降低
	e.冰塞	是	降低
类型四:	a.大型动物行迹	否	不变
其他因素导致的冲决	b.河道迁移至邻近的废弃河道	_	不变

注:Sa为潜在的冲决坡度(the slope of the potential avulsion course),Se为现有河道的坡度(the slope of the existing channel)。



(a)Sa不变,河道弯度增大导致Se减少,Sa/Se增加,最终引发冲决,其中Se=( $h_e/y_e$ )×100%,上下游高程差 $h_e$ 不变,河道长度 $y_e$ 增大;(b)Sa不变,三角洲生长(分流河道向前延伸)导致Se减少,Sa/Se增加,最终引发冲决,其中Se=( $h_e/y_e$ )×100%,上下游高程差 $h_e$ 不变,河道长度 $y_e$ 增大;(c)Se不变,天然堤/冲积脊增长导致Sa增加,Sa/Se增加,最终引发冲决,其中Sa=( $h_e/y_e$ )×100%,潜在坡度的水平距离 $y_a$ 不变,上下游高程差 $h_a$ 增大

Fig.2 Influence of slope ratio change on avulsion (after Jones *et al.*<sup>[36]</sup>)

以提供最为便利且跨度更长的冲决过程,但是在参数的设计与模型的精度上又很难达到真实河道的水平。只有将这些研究成果相互对比,不断改进,才能得到更为准确的结果。

# 3 冲决的演化模式与分类方案

前人主要根据现代沉积中河道的演化样式<sup>[27,41,43]</sup> 与古代露头中砂体的叠置关系<sup>[1,29,44]</sup>对冲决进行分类, 常用的冲决类型为决口型冲决、下切型冲决、废弃河 道再占用型冲决等(表2)。其中决口型冲决与废弃 河道再占用型冲决的定义,主要源自对现代沉积的 观察,用于描述河道的演化过程<sup>[27,41-43]</sup>;下切型冲决主 要源自对古代露头的观察,用于描述厚层的河道砂 体与下伏泛滥平原的突变接触<sup>[1,29,44]</sup>。特别是

Slingerland *et al.*<sup>[37]</sup>所定义的下切型冲决,在决口型冲决的远端<sup>[44]</sup>,河道再占用型冲决当中<sup>[1,43]</sup>,以及缺乏决口扇的河流体系当中均有出现<sup>[44]</sup>。

## 3.1 决口型冲决

决口型冲决(avulsion accompanied by crevasse-splay deposits)<sup>[43]</sup>主要源自于Smith *et al.*<sup>[27]</sup>对Cumberland Marshes的研究成果,即冲决体系由决口水道的不断 延伸导致旧河道的不断废弃,并最终形成新一期的 河道体系(图3),当时被Smith *et al.*<sup>[27]</sup>定义为前积型冲 决(avulsion by progradation)。在此之前,Bridge<sup>[46]</sup>曾认 为冲决可能由逐渐扩大的决口扇产生,但并未提供 更多论证。这种冲决类型也称作异粒岩相型冲决沉 积(heteroli - thic avulsion deposits)<sup>[29]</sup>、加积型冲决 (aggradational avulsion)<sup>[11]</sup>,或地层过渡型冲决 (stratigraphically transitional avulsion)<sup>[44]</sup>,该类型在野 外的典型标志为厚层的河道砂体底部为薄互层的决 口扇沉积体系<sup>[29,44]</sup>。

Smith et al.<sup>[27]</sup>将决口型冲决的演化过程分为4个 阶段:(1)冲决的初始阶段(initial avulsion stage),主 河道(旧河道)的流体与沉积物扩散并进入邻近泛滥 平原,形成小型决口扇复合体(类似于I型决口扇), 此时网状河道的数量不断增加(图3a,d);(2)网状阶 段(anastornosed stage)受流量与沉积物供给所限,网 状河道的数量最终达到动态平衡(以广泛分布的II 型决口扇与III型决口扇为主要特征),在此过程中, 旧河道的废弃伴随着新河道的形成(图3b,d);(3)逆 转阶段(reversion stage),沉积物的不断堆积导致泛 滥平原与主河道(旧河道)间的坡度降低,分流河道 的废弃速率大于形成速率,此时流体开始集中在数 量不断减少且宽度不断扩大的河道中(图3b,d); (4)单一河道阶段(single channel stage)伴随着旧河 道(主河道)的废弃与新河道(主河道)的形成,并最 终形成新一期的大型河道带(图3c,d)。

决口型冲决演化模式<sup>[27]</sup>被后续的学者广泛接受, 并在现代沉积<sup>[31,41-43]</sup>与古代露头<sup>[1,29,44]</sup>中广泛使用。 Mohrig et al.<sup>[11</sup>使用"加积型冲决"一词来描述Smith冲 决模式<sup>[27]</sup>(图4),其主要过程包括:(1)流体与沉积物 从冲决点溢出以网状河道的形式向泛滥平原的地势 低洼处前积,当网状河道流经先前的废弃河道时与 废弃河道汇聚并再次汇入主河道(图4a);(2)流体汇 入单一河道,并在旧河道下游与之汇聚,直至冲决结 束(图4b)。Mohrig模式<sup>[11]</sup>与Smith模式<sup>[27]</sup>的最大差异 在于尺度不同,Smith et al.<sup>[27]</sup>所调查的Cumberland Marshes冲决体系,其大型冲决带延伸范围可达数百 平方千米,而Mohrig et al.<sup>[127]</sup>所调研古代露头的规模则 远远小于大型冲决,更像是在建立局部范围内的冲 决模式。

决口型冲决模式的提出有利于解决以下几个问题:(1)河道的大规模改道(冲决)可以是渐变的,而 早期的数值模拟当中通常将冲决作为瞬时的突变过 程<sup>[24]</sup>;(2)冲决是泛滥平原加积的主要方式之一,而 早期的沉积学观点认为泛滥平原主要由越岸沉积组

		表2 冲决		分奀	万系
Table	2	Avulsion	model	and	classification

学者		分类		研究对象
Smith et al. <sup>[27]</sup>	_	—	前积型冲决	现代沉积
Kraus et al. <sup>[29]</sup>	—	—	异粒岩相型	古代露头
Morozova et al. <sup>[42]</sup>	—	河道再占用型	前积型冲决	现代沉积
Mohrig et al. <sup>[1]</sup>	下切型冲决(常伴随着废弃河道再占用)		加积型冲决	古代露头
Stouthamer <sup>[43]</sup>	河道再占用型 (伴随着主河道与泛滥平原直接接触)		决口型冲决	现代沉积
Slingerland et al. <sup>[17]</sup>	下切型冲决	合并型冲决 (河道再占用型)	前积型冲决	文献调研
Aslan et al. <sup>[41]</sup>	—	河道再占用型	前积型冲决	现代沉积
Jones et al. <sup>[44]</sup>	突变型冲决		过渡型冲决	古代露头
Lowe et al. <sup>[45]</sup>	—		前积型冲决	三维地震
本文建议1	突变型冲决		过渡型冲决	岩心与露头
本文建议2	废弃河道再占用型冲决		决口型冲决	三维地震



(a)冲决的初始阶段,形成小型决口扇复合体(I型决口扇);(b)随着冲决的不断进行,新河道不断生成,旧河道不断废弃(以II、III型决口扇为主,该类河道较 窄,且比较固定,类似于网状河),其中圆圈内的2、3、4分别对应冲决的网状阶段、逆转阶段、单一河道阶段(注意:该模式对应现代沉积的平面展布范围为数百 平方公里);(c)冲决最终形成新一期的河道带,并导致冲决点下游的河道完全废弃;(d)4期冲决演化阶段的河道数量;(e)图 c 中 X – Y 剖面的理想展布形态

Fig.3 Large-scale avulsion by progradation (after Smith *et al.*<sup>[27]</sup>)

成<sup>[27-28]</sup>;(3)对于所观察到的决口扇过渡为主河道的 序列,大多可以解释为决口型冲决现象。

需要注意的是,并不是所有的决口型冲决都能 观察到"由底部决口扇向上过渡为主河道"的沉积序 列。(1)在决口型冲决演化的末期,单一河道汇聚早 中期所有的流体与沉积物,该河道不断地变宽变大 且深切下伏地层,可能将下伏的决口扇侵蚀殆尽,导 致新一期的主河道在垂向序列上直接表现为主河道 与泛滥平原直接侵蚀接触<sup>[43]</sup>;(2)在远离旧河道的区 域,在早期冲决的过程中并没有沉积大量的决口扇 体系,因此当新一期河道流经旧河道远端区域的时 候,也可能表现出主河道与泛滥平原直接侵蚀 接触<sup>[44]</sup>。

#### 3.2 河道再占用型冲决(下切型冲决)

河道再占用型冲决(avulsion by reoccupation) 是指越岸流体(或决口水道)占用原先的废弃河道 (废弃河道多为泛滥平原的低洼处),并在该废弃河 道的基础上不断地延伸扩大并最终形成大规模的冲 决河道(图4c,d)<sup>[1,17,43]</sup>,这一现象在Mississippi河<sup>[41]</sup>、 Cumberland Marshes<sup>[42]</sup>、Rhine-Meuse 三角洲<sup>[43]</sup>等现代 沉积体系中多有发现。Slingerland *et al.*<sup>[17]</sup>认为该冲 决类型使用合并型冲决(avulsion by annexation)更为 合适,因为河道的合并用既可以包含占用废弃河道 (传统意义上的河道再占用型)也可以包含占用活跃 河道。但多数学者仍采用河道再占用型冲决,可能 是由于活跃河道的再占用主要集中在河道带内(特



(a,b)局部范围内的小型决口型冲决模式(注意:Mohrig使用"加积型冲决"一词),a为流体流出主河道并形成网状化河道体系,向泛滥平原低洼处堆积并与早期的废弃河道汇聚(类似于Smith模式的冲决I~III期),b为网状化河道汇聚形成单一流体,并在旧河道下游与之汇聚;(c,d)河道再占用型冲决(下切型冲决),其中c为冲决流体再次占用原先的废弃河道,并不断向前侵蚀,d为新一期冲决河道与旧河道在下游汇聚,并切割下伏泛滥平原 Fig.4 Avulsion by aggradation (progradation) and reoccupation (incision) (after Mohrig *et al.*<sup>(1)</sup>)

别是辫状河体系内活跃河道的不断变换),且合并型 冲决一词无法直观地表达这种冲决方式。

河道再占用型冲决在古代露头上的典型特征 包括:(1)复合砂体呈阶地状多期叠置<sup>[11</sup>;(2)每期河 道之间(河道废弃到再次占用期间)由于泥岩长期 暴露地表使得每期河道砂体之间的泥岩颜色呈氧 化色<sup>[1,47]</sup>。Mohrig et al.<sup>[11</sup>认为导致河道被重新占用的 原因包括:(1)只要现存的废弃河道没有被完全充 填,就为越岸流体提供现成的输送渠道;(2)即使被 充填了,砂质的河道充填要比相邻的泛滥平原更容 易被冲刷。

需要注意的是,这种河道再占用型的冲决模式 被 Mohrig命名为下切型冲决<sup>11</sup>,用于表示河道沉积与 下伏的泛滥平原的直接接触,且中间并没有薄互层 决口扇的过渡。在后续的研究中,Slingerland *et al.*<sup>117</sup> 将河道再占用型冲决与下切型冲决分开,作为第三 种冲决类型。尽管这种与泛滥平原直接接触的下切 型冲决类型在露头中广泛分布<sup>11,43-44</sup>,但很难作为一种 单独的冲决演化方式,因为决口型冲决也可能伴随 着河道的下切或与泛滥平原突变接触的现象(决口 型冲决的末期主河道的下切;决口型冲决远端区域, 河道底部缺乏决口扇沉积体系),而河道再占用型冲 决也可能由于河道下切深度较浅仍在底部残存决口 扇沉积。因此,这些概念之间的相互交叉导致在应 用过程中会受到很大的限制,为了在应用当中避免 分歧,建议在使用现代沉积或地震切片研究河道的 演化方式时(这些资料更容易在宏观上观察到河道 演化的整个过程),仅使用决口型冲决与河道再占用 型冲决进行描述。

#### 3.3 其他冲决模式

决口型冲决与河道再占用型冲决是早期较为经 典的冲决演化形式。近年来随着调研的不断深入, 学者们提出了木塞充填冲决模式、回水冲刷冲决模 式等。

木塞充填冲决模式基于 Gibling 对加拿大 Pennsylvanian South Bar 组辫状河露头的观察总结出 木塞充填河道的演化模式<sup>[48]</sup>。该模式主要包含4个 阶段:(1)河道内洪水沉积物的堆积;(2)木质阻塞, 河道加宽与河岸侵蚀;(3)冲决与河道废弃;(4)河道 再激活。但是该模式的前两个过程似乎侧重冲决前 的准备工作,或冲决的前置因素(冲决事件之前河道 自我调整并接近冲决门限),而导致河道阻塞加宽与 河岸侵蚀的原因除木塞以外,冰塞、岩体垮塌等多种 阻塞现象均适合这一模式。因此该模式对于木塞所 引发的冲决现象具有一定的研究意义,但很难作为 标准模式推广。

回水冲刷冲决模式源自于 Donselaar et al.[49]对玻 利维亚阿尔蒂普拉诺内流盆地科罗拉多河的研究, 李嘉光<sup>[50]</sup>对这一冲决体系做综述性讨论。回水冲刷 冲决模式的过程主要包括[49-50]:(1)洪水期决口水道 略微侵蚀堤岸与相邻泛滥平原,决口水道位于主河 道上方(图5a);(2)洪水衰退期,泛滥平原中的流体 向低洼的决口水道汇聚并回流至主河道内,在此过 程中,回流的流体冲刷导致决口水道变长变宽且不 断下切天然堤,在此过程中决口水道与主河道河床 之间的高差逐渐减小(图5b);(3)决口水道进一步增 长变宽并不断下切,导致决口水道河床与主河道河 床之间的高差几乎接近于0,此时即便在低水位期, 主河道的流体也可以进入决口水道(图5c);(4)决口 水道最终捕获主河道的全部流体,直到主河道废弃 (图5d)。回水冲刷冲决模式基于干旱湖盆曲流河末 端细粒沉积体系<sup>[50]</sup>,而前积型模式中的Cumberland Marshes 地区为半湿润气候[27-28],气候差异可能是这种



图 5 半干旱河流体系的冲决模式(据 Donselaar *et al.*<sup>[49]</sup>) Fig.5 Avulsion of semi-arid fluvial systems (after Donselaar *et al.*<sup>[49]</sup>)

模式差异的控制因素之一。此外,回水冲刷冲决模 式中的天然堤较低<sup>491</sup>,但后期Toorenenburg根据这一 模式提出的与冲决相关的决口扇的演化过程中却使 用了较高的天然堤高程<sup>[51]</sup>,该模式似乎是Donselaar 回水冲刷冲决模式<sup>[49]</sup>与Toorenenburg复合决口扇模 式<sup>[52]</sup>的混合类型。

此外,在三角洲朵体的迁移当中,Hoyal et al.<sup>181</sup>认 为三角洲朵体的"冲决旋回"分为4个阶段,即河道冲 决→侵蚀→河道延伸→河道回填与废弃,Edmonds et al.<sup>171</sup>认为三角洲在朵体延伸→冲决→废弃的不断循 环中不断地创造新的湿地。这些模式对于三角洲体 系5级构型的划分具有一定理论意义,但除了河道回 填与废弃的过程,其他环节与决口型冲决模式<sup>1271</sup>仍存 在诸多近似之处。

# 4 冲决的砂体展布特征与识别方式

随着地震资料品质的提升,一些区块的地震精 度已经可以达到单一河道[45,53-60]甚至侧积层级别[61]。 近年来,国外的石油工作者针对储层范围内的冲决 现象进行研究, Lowe et al.[45]以井震结合的手段对孟 加拉湾西侧上新世戈达瓦里河深水—水道体系的冲 决过程进行详细描述,认为该地区水道在冲决的早 期形成决口扇复合体(可能为复合辫状水道),随后 流体沿着单一的主水道汇聚局部的流体,并伴随着 水道下切与天然堤建造,最后水道体系被充填。这 一结果与Smith的前积型模式<sup>[27]</sup>近似。Zhao et al.<sup>[60]</sup>利 用高分辨率三维地震对尼日尔三角洲大陆坡上海底 水道冲决过程的分析,认为该冲决水道受控于坡度 的先增加后降低,从上游到下游依次为盘状的、深U、 深V、浅U状,并将该冲决水道的演化充填过程分为4 个阶段。但是国内的石油工作者对河道的冲决(大 规模改道)现象或者说5级构型级别河道的演化与展 布方式尚未进行充分的探讨。因此有必要对冲决河 道的砂体展布特征与识别方式进行综述,并结合冲 决的演化模式,为储层范围内冲决概念的应用提供 理论支持。

#### 4.1 单井与露头的识别标志

对于冲决的露头识别,前人通常将冲决归为 两类<sup>[1,29,44]</sup>,一种为地层过渡型冲决,通常由底部的决 口扇向上过渡为河道砂体,这种类型通常与决口型 冲决模式有关;另一种为地层突变型冲决,即河道 砂体与泛滥平原直接接触,下伏几乎不含决口 扇<sup>[1,27,29,43-44,62]</sup>。早期的观点认为,决口型冲决对应过渡 型序列<sup>[29]</sup>,河道加积较快<sup>[16-17]</sup>,且"先充填后下切"<sup>[1]</sup>; 河道再占用型对应突变型序列<sup>[1,43]</sup>,河道加积缓慢<sup>[17]</sup>, 且"先下切后充填"<sup>[1]</sup>。这些特征对多数情况适用。

在识别地层过渡型冲决(多为决口型冲决)方 面,最简单的指标为泛滥平原→决口扇→河道砂体 的垂向序列(图 6a~c)。Kraus et al.<sup>[29]</sup>将决口型冲决 的露头识别细分为8个指标:(1)冲决沉积的顶部或 底部发育中等厚度或较厚的古土壤(或煤层);(2)与 干流(trunk channel)相伴生的砂体直接位于冲决沉 积体系之上;(3)冲决沉积为异粒岩相(heterolithic deposits),细粒沉积环绕在条带状或薄层席状的砂岩 周围;(4)与冲决相关的细粒沉积仅仅经受了初始的 成壤改造,并可以此与泛滥平原沉积(长期暴露)进 行区分;(5)许多条带状砂岩与干流的古水流方向平 行或亚平行;(6)条带状砂体的宽厚比小于10;(7)伴 随着薄层砂席的条带状砂岩表明网状的决口水道曾 经占据了泛滥平原的特定区域;(8)异粒岩相沉积在 侧向上广泛分布,表明它们曾分布在广泛的泛滥平 原之上。尽管 Kraus et al.<sup>[29]</sup>所定义的理论迅速成为 识别地层过渡型冲决的主要标准,但是由于其提出 的 8 点指标主要源自其观察的古代露头与 Smith et al.<sup>[27]</sup>所调研的现代沉积。可能存在以下问题:(1)条 带状砂体的宽厚比范围可能有所偏差,Gibling<sup>[63]</sup>认为 与决口扇相伴生的冲决河道的宽厚比最大可达 20, 但通常小于 15(该数据大多源自于曲流河与网状河 体系),且河道带的宽厚比根据上游与下游的差异而 相差较大<sup>[39,64]</sup>,也可能引发单一河道宽厚比的差异; (2)许多条带状砂岩与干流的古水流方向平行或亚平 行的展布特征可能更适用于存在一定坡度的地带,在 坡度的控制下大部分冲决河道朝向低洼的区域汇聚。

在识别地层突变型冲决方面,最简单的指标为 泛滥平原与河道砂体的直接接触(图6d~g)。有关地 层突变型冲决的露头识别要更加复杂。早期的研究 认为地层突变型冲决与废弃河道的再次占用有关, 在冲决河道占用废弃河道的过程中,多期河道砂体 不断切割叠置,导致河道底部的决口扇被冲刷,最终 形成与泛滥平原直接接触的多期叠置的复合砂



(a)地层过渡型冲决(大多为决口型冲决)序列,由向上变粗的决口扇过渡为(冲决)主河道,主河道可能切入下伏的决口扇(据 Jones et al.<sup>[44]</sup>);(b)地层过渡型冲决露头(据 Hajek et al.<sup>[62]</sup>);(c)地层过渡型冲决剖面模型(据 Hajek et al.<sup>[62]</sup>);(d)地层突变型冲决(大多为河道再占用型冲决或缺乏决口扇沉积的冲决)序列(据 Jones et al.<sup>[44]</sup>);(e)地层突变型冲决露头(据 Hajek et al.<sup>[62]</sup>);(f)缺乏决口扇沉积引发的地层突变型冲决(据 Hajek et al.<sup>[62]</sup>修改);(g)废弃河道再占用引发的地层 突变型冲决(据 Chamberlin et al.<sup>[65]</sup>修改)



体[1.17,43]。但是多期叠置的复合砂体在露头或者连井 剖面当中往往具有多解性。Chamberlin et al. [65]认为, 多期叠置的复合砂体可以同时在三种河流类型中出 现:(1)河道带内的沉积过程,如沙坝的迁移、活跃河 道的迁移、截弯取直、流体的季节性波动;(2)河道再 占用型冲决;(3)下切谷的充填。从多期叠置的砂体 中识别河道再占用型冲决的方法主要包括(图6g): (1)复合砂体呈阶地状多期叠置[1.65];(2)每期河道之 间(河道废弃到再次占用期间)由于泥岩长期暴露地 表使得每期河道砂体之间的泥岩颜色呈氧化色[1.47]; (3)再占用型河道切割原先局部稳定的泛滥平原沉 积(冲决前泛滥平原的长期稳定沉积)<sup>[6]</sup>。此外, Jones et al.<sup>[44]</sup>认为,地层突变型冲决并不仅仅由废弃 河道的再次占用产生,地层突变型冲决的成因可能 为:(1)冲决沉积的形成地带远离与干流相伴生的决 口扇区域,并推断地层突变型以区域性冲决为主; (2)泛滥平原加积以越岸沉积(席状砂)为主,几乎不 发育决口扇,低幅度、高黏性、泥质的天然堤以及粗 粒的河道沉积物可能是不发育决口扇的主要原因; (3)突变型冲决产生于河道频繁下切的区域;(4)泛 滥平原特征如,地势地貌、有无植被覆盖、植被类型、 水位、是否存在或缺乏早期的河道,以及基底的可侵 蚀性都可能是控制河道与泛滥平原突变接触还是渐 变接触的原因之一(Mohrig et al. "认为排水状况较好 的泛滥平原促使流体向前流动并侵蚀地表,形成这 种突变接触类型)。

河道下部有无决口扇沉积在储层范围内有着一 定的研究意义:(1)可以作为河道演化方式的判别依 据,有助于为储层范围内河道与砂体的展布特征提 供更多的模式依据;(2)地层突变型比地层过渡型存 在着更加稳定的隔夹层,导致主力砂体上下之间的 连通性变差;而地层过渡型主力砂体之间的薄层决

口扇与溢岸砂在一定程度上会增加河道砂体的连通 性。张红薇等166通过对大庆油田密集井网下砂体展 布的分析,认为当河间砂体位于河道砂体中、下部 时,主力砂体的连通较好(可能是由于主力砂体底部 的河间砂体大多形成于 Smith 冲决演化序列的Ⅱ期 与Ⅲ期四,其分布范围较广并具有一定规模),而当 河间砂体层位较高,且仅与河道砂顶层的薄互层状 砂岩层位相对应时,二者连通较差;(3)与地层过渡 型相关的决口扇砂体可以为油气的富集提供良好的 次要储集层166711,邓庆军等1711通过对萨中开发区断东 区块萨二油层组的分析,认为决口水道的有效厚度 通常大于0.5 m,周连德等<sup>[70]</sup>通过对渤中34-X油田北 块1井区明化镇组下段V油组的沉积特征进行分析, 认为决口扇单层厚度通常小于3m,但累计厚度可达 10m,马世忠等<sup>111</sup>认为决口扇水道是剩余油形成和产 能挖潜的重要对象之一,对其进行研究具有重要的 实用价值。这些研究结果表明,决口扇作为次要的 储集层,具有一定的开发价值。但是在河流相储层 的精细表征中往往被忽略,结合决口型冲决的演化 模式与识别标志,可以为与冲决相关的大型决口扇 储层的精细刻画提供理论依据。

## 4.2 平面展布特征

了解冲决河道的平面展布样式有助于在油藏范 围内对多样的河道展布模式进行归类,并根据不同 类型的砂体叠置关系与河道展布形态,建立更为精 准的三维地质模型与井网部署方案。在冲决河道的 平面展布上,Slingerland *et al.*<sup>117</sup>根据冲决河道的平面 展布样式,将冲决划分为6种类型(图7),其中完全 冲决(full avulsion)导致冲决点下游的旧河道完全废 弃;部分冲决(partial avulsion)使得旧河道中的部分 流体迁移至新河道中;点冲决(nodal avulsion)的冲决 点相对固定;随机冲决(random avulsion)则是沿着河



道方向以任意点的方式发生冲决;局部冲决(local avulsion)是指冲决河道在下游与旧河道再次汇聚,类 似于曲流河的截弯取直;区域冲决(regional avulsion) 是指更大规模的冲决事件,并影响冲决河道下游广 泛的区域。需要注意的是,这些分类概念并不是相 互排斥的,不同的冲决类型之间可以互相搭配构成 同一套冲决体系,如Smith的大型决口型冲决模式<sup>[27]</sup> 几乎包含了以上所有的展布类型,而Mohrig模式<sup>[11]</sup>主 要为局部冲决。此外,对于分流河道体系而言,多条 分流河道可能并不是同时产生的,而是多期冲决所 形成的河道体系(图8),在储层范围内区分河道的期 次通常可以利用平面上砂厚差异、薄层河间砂、钻遇 河道、顶面层位差异、动态特征来划分不同河道的 期次<sup>[19-20,72]</sup>。

根据前人研究的结果,并结合油藏工程实践,建 议在拥有高分辨率三维地震的区块,使用决口型冲 决与河道再占用型冲决来研究古代河道的演化样 式,并根据单井资料进一步研究古河道不同演化过 程中的砂体叠置样式(河道与泛滥平原是突变接触 还是渐变接触);在缺乏高分辨率三维地震的区块,则推荐使用突变型冲决与过渡型冲决来研究河道与 泛滥平原的接触关系,并根据接触关系结合密集井 网下的连井资料尽可能地恢复古河道的展布样式。 但需要强调的是,只有具备高分辨率三维地震切片 才能准确地识别古河道的冲决演化与叠置方式。

# 5 存在问题与讨论

## 5.1 冲决与储层构型

构型是指不同级次构成单元的形态、规模、方向 及叠置关系<sup>[73]</sup>。然而在储层构型领域,国内主要关注 3~4级界面,即隔夹层或单砂体级别,对河道、河道 带,或三角洲朵体级别砂体演化与展布的研究相对 较少。Miall<sup>74</sup>认为5级构型即主河道与三角洲朵体 当中河道的迁移主要受到冲决控制,且冲决是理解 如何产生大型河流构型的关键,对冲决的深入研究 可以为大型河道的演化提供参考。

在5级构型(即单一河道复合体级别,如单一曲 流带或辫流带)的演化当中,前人[2-8,24]大多以数值模 拟对河道化沉积体系演化过程中河道的大小、形状、 地层组合、叠置密度,以及河道的连通性进行讨论。 在数值模拟当中,Bridge et al.<sup>31</sup>认为,当冲决频率恒定 时,河道带的连通性与沉积速率呈反比。Heller et al.<sup>15</sup>建立了砂体叠置关系与沉积速率、冲决频率之间 的关系模型(图9),并提出当b=1时,冲决频率与沉 积速率的增大率相同,砂体的叠置类型在不同的沉 积速率下不变;当b<1时,冲决频率(在一定时间内的 冲决次数)的增大速率小于沉积速率(沉积物对可容 空间充填的速度),随着沉积速率的增大,砂体的叠 置类型由叠置型向孤立型转化;当b>1时,冲决频率 的增加速率大于沉积速率,随着沉积速率的增大,砂 体的叠置类型由孤立型向高砂地比的叠置型转化。 这些模拟的结果可以为油藏范围内砂体的连通性与 叠置关系提供理论参考,但使用数值模拟的结果需 要现代沉积与储层资料的不断修正。

此外,由于储层构型的表征逐渐由定性表征向 定量表征过渡,量化的参数可以为储层范围内单一 河道的刻画提供一定的参数支持。尽管前人在侧积 层产状<sup>[75-76]</sup>、点坝的宽厚比与长宽比<sup>[77-78]</sup>,以及利用交 错层理与砂丘厚度估算满岸河深<sup>[79]</sup>等领域做了大量 的工作,但对冲决条件下5级构型定量表征的研究相 对较少。Edmonds *et al.*<sup>[80]</sup>的研究表明,冲决路径与河 道带的宽度成一定比例(针对局部冲决),冲决河道 (局部冲决)侧向迁移的距离(hop length)为2.5个河



图 8 同时期与多期的分流河道体系(据 Donselaar *et al.*<sup>[49]</sup>) (a)同时活跃的分流河道体系;(b)由连续的点冲决形成的多期河道,注意多期的冲决河道容易被误认为是同时期的 Fig.8 Distributary channels of single and multiple periods (after Donselaar *et al.*<sup>[49]</sup>)



frequency (from Heller *et al.*<sup>[5]</sup>)

道带宽度,冲决长度(avulsion length)为13.4个河道带 长度,而冲决长度大约是冲决河道侧向迁移的距离 的5.4倍。Gibling et al.<sup>[63]</sup>认为与决口扇相伴生的冲 决河道的宽厚比可达20,但通常小于15。Yalin<sup>[81]</sup>认 为,分流河道的每次分叉(小规模的冲决),都会使河 道的宽度与深度分别发生改变,其关系式为W<sub>n+1</sub>≈ 0.7W<sub>n</sub>,H<sub>n+1</sub>≈0.8H<sub>n</sub>,其中,W为河道宽度,H为河道深 度,n为河道分叉的期次。冲决控制下大型河道的定 量表征有利于河流相储层5级构型地质知识库的建 立与完善,仍需要在后续的研究中不断补充。

## 5.2 自旋回与异旋回对冲决的影响

河道的冲决受自旋回(河道自身的调整)控制, 还是受自旋回与异旋回(海平面升降,构造,气候)共 同作用,目前仍存在较大争议。目前大多数学者认 为冲决主要受自旋回控制,同时也可能受异旋回作 用的影响<sup>[1,30,40,82]</sup>。

在自旋回控制方面,一般认为<sup>[1,1783]</sup>,河流体系中 沉积物在河道中运移,河道内部与边部的沉降速率 要比相邻泛滥平原的沉降速率高得多,从而引发河 道加积,可以使河道的底部高于相邻泛滥平原,这一 过程最终引发河道冲决至泛滥平原中相对低洼稳定 的区域。一旦新的河道建立起来,这一旋回将再次 发生,从而构成一期期的自旋回过程。即河道的自 我调整(导致的坡度调整)是控制冲决的主要原因。 也有部分学者认为河道的冲决仅仅受到自旋回作用 控制<sup>[83]</sup>。

在异旋回控制方面,海平面升降、构造、气候在 一定程度上可能影响河道的冲决,但这些观点也受 到一定的争议。在海平面(注意,对海相或海陆过渡 相而言,基准面一般是指海平面或相对海平面,可容 纳空间使用海平面与海底之间的距离度量[37])对冲 决的控制方面, Stouthamer et al.[38-39]通过对 Rhine-Meuse 三角洲的观测,认为基准面(海平面)上升速 率快速增加导致顺流坡度急剧下降,从而引发较高 的冲决频率,这是目前被普遍接受的观点。但是 Moran et al.<sup>[84]</sup>通过动态地貌模拟得克萨斯州崔尼蒂 河在早全新世海侵时期的河道冲决时却提出了相反 的观点,认为对于三角洲体系的冲决而言,基准面上 升速率的增加为沉积物创造更多的可容纳空间,使 河道不容易达到冲决门限,而基准面上升速率的下 降导致河道冲决频率的增加,且当基准面上升速率 大于4.5 mm/yr时,此时冲决受阻,因为河道内的沉 积不足以达到冲决所需的门限。在气候对冲决的控 制方面, Grenfell et al.<sup>[85]</sup>认为气候的变化会影响冲决 的规模与频率;Stouthamer et al.[86-87]认为,在湿润的气 候条件下冲决的频率可能较高;此外,Stouthamer et al.<sup>[38]</sup>认为,在湿润的气候条件下,河道流量增加引发 河道加积速率增大(引发局部/区域性加积速率之比 增大),从而导致横穿河谷的梯度增加,并可能引发 更高频率的冲决。但是气候对冲决的影响也有一些 反对的观点,Tooth et al.[88]通过将Klip河的冲决记录 与晚第四纪古气候做对比,发现该区域的冲决频率 与气候变化并没有关系,并认为下切型冲决与异旋 回机制无关,而是曲流带演化过程中自旋回的结果; Larkin et al.<sup>[89]</sup>通过分析历史中的航拍照片,并利用光 释光法 (optically stimulated luminescence) 对南非 Tshwane河流沉积进行测年,认为区域性气候变化与 特定冲决时间定年之间缺乏对应关系,表明冲决并 不是由异旋回驱动,而是由自旋回驱动,并作为河道 带演化的一部分。在构造对冲决的影响方面,一般 认为局部构造的改变会引发顺流坡度与横向坡度的 变化,从而影响河道的冲决[36,38]。

在储层构型领域,吴胜和等<sup>[73]</sup>认为,目前已有的 构型界面分级主要偏重于自成因因素作用结果,而 对异成因旋回级次考虑不够;张昌民等<sup>[90]</sup>认为,在研 究扇三角洲当中,应当注重运用流体力学和水力学 原理,对扇三角洲的岩石相进行成因解释,注重研 究构造作用、气候变化、湖(海)平面变化以及沉积 自旋回对扇三角洲沉积层序形成的控制作用。探 讨自旋回与异旋回对冲决的影响有利于对这一盲 区进行补充,并为后续的研究提供基础资料。

#### 5.3 冲决与河型转化

近年来河型转化问题逐渐引起了沉积学家的重视<sup>[10,91-95]</sup>,其中大部分侧重于辫状河与曲流河之间的 演化,而Smith et al.<sup>[27]</sup>的一个完整的决口型冲决过程 对应单一河道→小型决口扇(演化I期中的I型决口 扇)→网状河道(演化II~III]期的区域性II、III型决口 扇)→单一河道(演化IV期中主河道的下切变宽并伴 随侧向加积)的转化(图3)。

在辫状河一曲流河转化当中,一般认为河型的转化受到基准面旋回、物源供给、地形坡度及古气候的变化的控制<sup>[93-95]</sup>。而在河道冲决过程中,多数学者认为随着基准面(海/湖平面)的快速上升<sup>[38-39]</sup>、流量的急剧增大<sup>[32-33]</sup>、构造倾斜或局部隆升<sup>[36,38]</sup>,以及湿润的气候<sup>[38,87]</sup>均可能造成河道的冲决频率增大。而对于决口型冲决体系<sup>[27]</sup>而言,冲决频率的增大将导致河道体系由早期的大型单一河道向网状化河道转化。

随着河型转化问题在沉积学领域的深入研究, 在局部范围乃至开发区块当中,不同河型的分类与 展布情况可能要比原先的模式更加复杂。由于 Smith *et al.*<sup>[27]</sup>基于Saskatchewan冲决复合体所建立的 决口型冲决模式,涵盖了数百平方千米的面积,单一 河道—网状河道之间的转化可能影响较大的区域(图 3),甚至影响超短期的基准面旋回。针对低砂地比的 曲流河储层,或位于三角洲平原的网状河道储层而 言,使用决口型冲决模式有利于对主力河道(Smith模 式的 IV 期河道)与次级河道(Smith模式的 II~III 期河 道)之间的配比与演化提供更多的理论参考,为储层 范围内河道体系的精细刻画提供更多依据。

# 6 结论与认识

(1)阐述了冲决的概念,以及冲决与决口、改道的异同。广义的冲决概念指代所有河道化体系的改道,但狭义的冲决概念是指流体快速流出原先稳定的

河道带,侵蚀泛滥平原,或占用泛滥平原中的废弃河 道,最终形成新的河道带。与改道相比,广义的冲决 概念可以作为改道的近义词。与决口相比,冲决覆盖 面积更大(可涵盖数百平方千米),持续时间更长(通 常大于100年),且冲决河道与原先的主河道大多呈 平行或亚平行展布。鉴于截弯取直、河道废弃等概念 在油藏描述中已经广泛应用,且这些概念在解决单砂 体刻画时有着特殊的含义,推荐使用冲决的狭义概 念,即仅使用冲决一词解释大规模的河道改道现象。

(2)明确了冲决的主要控制因素。坡度比是冲 决的主要控制因素,坡度比的不断调整使河道逐渐 接近冲决门限,并在一定的触发机制下产生冲决。 影响坡度比变化的因素包括海平面升降、构造变化、 天然堤加积、泛滥平原加积、差异压实、河道的延伸 与侧向加积。除坡度比之外,天然堤的抗冲性(砂质 天然堤还是泥质天然堤)、泛滥平原的地貌特征(地 表植被、水位、排水状况、废弃河道)是河道冲决的次 要控制因素。综合现代沉积、古代露头、数值模拟等 多种观测手段,将为冲决的成因提供更多的参考。

(3) 总结了冲决的演化模式与分类方案,提出了 适用于储层沉积学的分类方案。冲决的主要分类依 据为现代沉积中河道的演化样式与古代露头中砂体 的叠置关系,主要包括决口型冲决(过渡型冲决)、下 切型冲决(地层突变型冲决)、废弃河道再占用型冲 决、回水冲刷型冲决等。决口型冲决由决口扇的进 一步延伸形成,在垂向上主要发育决口扇向主河道 演化的序列。河道再占用型冲决通过流体占用并激 活邻近的废弃河道形成,在垂向上通常为呈阶地状 多期叠置的砂体并多与泛滥平原直接接触。不同冲 决模式的分类方案之间很难找到完全排他的方案。 在实际应用过程中,建议国内的沉积学家在具有高 分辨率三维地震的情况下使用决口型冲决与废弃河 道再占用型冲决识别不同的河道类型与演化方式, 但在仅具备单井取心资料或野外露头资料时使用地 层过渡型冲决与地层突变型冲决的分类方案来区分 河道之间的叠置关系。

(4)讨论了冲决在储层构型、河型转化等当前热 点问题应用前景。建议引入冲决的概念来完善储层 构型领域5级构型的演变、大型河道化体系的地质知 识库的建立,以及异旋回对储层构型的影响。并建 议使用决口型冲决的演化模式解释河型转化当中大 型单一河道与网状化河道相互转化的沉积特征。

- [1] Mohrig D, Heller P L, Paola C, et al. Interpreting avulsion process from ancient alluvial sequences: Guadalope-Matarranya system (northern Spain) and Wasatch Formation (western Colorado)
   [J]. Geological Society of America Bulletin, 2000, 112(12): 1787-1803.
- [2] Allen J R L. Studies in fluviatile sedimentation: An exploratory quantitative model for the architecture of avulsion-controlled alluvial suites[J]. Sedimentary Geology, 1978, 21(2): 129-147.
- Bridge J S, Leeder M R. A simulation model of alluvial stratigraphy[J]. Sedimentology, 1979, 26(5): 617-644.
- [4] Leeder M R. A quantitative stratigraphic model for alluvium, with special reference to channel deposit density and interconnectedness[M]//Miall A D. Fluvial sedimentology. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 5, 1978: 587-596.
- [5] Heller P L, Paola C. Downstream changes in alluvial architecture: An exploration of controls on channel-stacking patterns[J]. Journal of Sedimentary Research, 1996, 66(2): 297-306.
- [6] Bryant M, Falk P, Paola C. Experimental study of avulsion frequency and rate of deposition [J]. Geology, 1995, 23 (4) : 365-368.
- [7] Edmonds D A, Hoyal D C J D, Sheets B A, et al. Predicting delta avulsions: Implications for coastal wetland restoration[J]. Geology, 2009, 37(8): 759-762.
- [8] Hoyal D C J D, Sheets B A. Morphodynamic evolution of experimental cohesive deltas [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2009, 114(F2): F02009.
- [9] 于兴河.碎屑岩系油气储层沉积学[M].2版.北京:石油工业 出版社,2008:284-288. [Yu Xinghe. Clastic hydrocarbon reservoir sedimentology [M]. 2nd ed. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008: 284-288.]
- [10] 李胜利,于兴河,姜涛,等.河流辫—曲转换特点与废弃河道 模式[J]. 沉积学报,2017,35(1):1-9. [Li Shengli, Yu Xinghe, Jiang Tao, et al. Meander-braided transition features and abandoned channel patterns in fluvial environment [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(1): 1-9. ]
- [11] 马世忠,王再山,王渝明.决口水道沉积模式及其砂体内剩余 油形成与富集[J].大庆石油地质与开发,2000,19(6):9-11, 14. [Ma Shizhong, Wang Zaishan, Wang Yuming. Residual oil formation and enrichment within crevasse channel sedimentary pattern and its sandbody[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(6): 9-11, 14. ]
- [12] 吴胜和,徐振华,刘钊. 河控浅水三角洲沉积构型[J]. 古地理 学报,2019,21(2):202-215. [Wu Shenghe, Xu Zhenhua, Liu Zhao. Depositional architecture of fluvial-dominated shoal water delta [J]. Journal of Palaeogeography, 2019, 21 (2): 202-215.]
- [13] 张昌民,尹太举,朱永进,等. 浅水三角洲沉积模式[J]. 沉积
   学报,2010,28(5):933-944. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Zhu

Yongjin, et al. Shallow-water deltas and models[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2010, 28(5): 933-944. ]

- [14] Miall A. Fluvial depositional systems [M]. Cham: Springer, 2014: 70-72.
- [15] Allen J R L. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments[J]. Sedimentology, 1965, 5(2): 89-191.
- [16] Makaske B. Anastomosing rivers: A review of their classification, origin and sedimentary products [J]. Earth-Science Reviews, 2001, 53(3/4): 149-196.
- [17] Slingerland R, Smith N D. River avulsions and their deposits
   [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2004, 32: 257-285.
- [18] Kleinhans M G, Ferguson R I, Lane S N, et al. Splitting rivers at their seams: Bifurcations and avulsion[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(1): 47-61.
- [19] 陈清华,曾明,章凤奇,等.河流相储层单一河道的识别及其 对油田开发的意义[J].油气地质与采收率,2004,11(3):13-15. [Chen Qinghua, Zeng Ming, Zhang Fengqi, et al. Identification of single channel in fluvial reservoir and its significance to the oilfield development[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2004, 11(3): 13-15.]
- [20] 吕晓光,赵翰卿,付志国,等. 河流相储层平面连续性精细描述[J]. 石油学报,1997,18(2):66-71. [Lü Xiaoguang, Zhao Hanqing, Fu Zhiguo, et al. A detailed description of area continuity of fluvial reservoir [J]. Acta Petrolei Sinica, 1997, 18 (2):66-71.]
- [21] 刘波,赵翰卿,王良书,等.古河流废弃河道微相的精细描述
   [J]. 沉积学报,2001,19(3):394-398. [Liu Bo, Zhao Hanqing, Wang Liangshu, et al. The detailed description of ancient fluvial abandoned channel micro-facies[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2001, 19(3): 394-398. ]
- [22] 徐丛亮,陈沈良,陈俊卿. 新情势下黄河口出汊流路三角洲体系 的演化模式[J]. 海岸工程,2018,37(4):35-43. [Xu Congliang, Chen Shenliang, Chen Junqing. Evolution mode of channel bifurcation delta system at the Yellow River estuary under the new situation[J]. Coastal Engineering, 2018, 37(4): 35-43.]
- [23] 郑珊,吴保生,周云金,等.黄河口清水沟河道的冲淤过程与 模拟[J].水科学进展,2018,29(3):322-330. [Zheng Shan, Wu Baosheng, Zhou Yunjin, et al. Erosion and aggradation processes and calculation method for the Qingshuigou channel on the Yellow River Delta[J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 322-330. ]
- [24] Mackey S D, Bridge J S. Three-dimensional model of alluvial stratigraphy: Theory and applications[J]. Journal of Sedimentary Research, 1995, 65(1b): 7-31.
- [25] Field J. Channel avulsion on alluvial fans in southern Arizona[J]. Geomorphology, 2001, 37(1/2): 93-104.
- [26] Yang H Y, Lin B L, Zhou J J. Avulsions in a simulated large lowland braided river[J]. Water Resources Management, 2018, 32(7): 2301-2314.

- [27] Smith N D, Cross T A, Dufficy J P, et al. Anatomy of an avulsion[J]. Sedimentology, 1989, 36(1): 1-23.
- [28] Smith N D, Perez-Arlucea M. Fine-grained splay deposition in the avulsion belt of the lower Saskatchewan River, Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 1994, 64(2b): 159-168.
- [29] Kraus M J, Wells T M. Recognizing avulsion deposits in the ancient stratigraphical record [M]//Smith N D, Rogers J. Fluvial sedimentology VI. Algiers: The International Association of Sedimentologists, 1999; 251-268.
- [30] Nienhuis J H, Törnqvist T E, Esposito C R. Crevasse splays versus avulsions: A recipe for land building with levee breaches
   [J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(9): 4058-4067.
- [31] Makaske B, Maathuis B H P, Padovani C R, et al. Upstream and downstream controls of recent avulsions on the Taquari megafan, Pantanal, south-western Brazil[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2012, 37(12): 1313-1326.
- [32] 陈志清.历史时期黄河下游的淤积、决口改道及其与人类活动的关系[J].地理科学进展,2001,20(1):44-50.[Chen Zhiqing. The deposition, breach, and diversion in the lower Yellow River and their relationships with human activities during the historical period[J]. Progress in Geography, 2001, 20(1):44-50.]
- [33] 钱宁. 1855年铜瓦厢决口以后黄河下游历史演变过程中的若 干问题[J]. 人民黄河,1986(5):66-72. [Qian Ning. Problems concerning evolution of the lower Yellow River subsequent to dykebreach in 1855 at Tongwaxiang [J]. Yellow River, 1986 (5):66-72.]
- [34] McCarthy T S, Ellery W N, Stanistreet I G. Avulsion mechanisms on the Okavango fan, Botswana: The control of a fluvial system by vegetation [J]. Sedimentology, 1992, 39 (5): 779-795.
- [35] Slingerland R, Smith ND. Necessary conditions for a meanderingriver avulsion[J]. Geology, 1998, 26(5): 435-438.
- [36] Jones L S, Schumm S A. Causes of avulsion: An overview [M]//Smith N D, Rogers J. Fluvial sedimentology VI. Algiers: The International Association of Sedimentologists, 1999: 171-178.
- [37] Catuneanu O. 层序地层学原理[M]. 吴因业,译. 北京:石油 工业出版社,2009:77-85. [Catuneanu O. Principles of sequence stratigraphy[M]. Wu Yinye, trans. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 77-85.]
- [38] Stouthamer E, Berendsen H J A. Avulsion: The relative roles of autogenic and allogenic processes [J]. Sedimentary Geology, 2007, 198(3/4): 309-325.
- [39] Stouthamer E, Cohen K M, Gouw M J P. Avulsion and its implications for fluvial-deltaic architecture: Insights from the Holocene Rhine-Meuse delta[M]//Davidson S K, Leleu S, North C P. From river to rock record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation. SEPM Society for Sedimentary Geology, 2011: 215-232.

- [40] Rajchl M, Uličný D. Depositional record of an avulsive fluvial system controlled by peat compaction (Neogene, Most Basin, Czech Republic) [J]. Sedimentology, 2005, 52(3): 601-625.
- [41] Aslan A, Autin W J, Blum M D. Causes of river avulsion: Insights from the Late Holocene avulsion history of the Mississippi River, U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2005, 75 (4): 650-664.
- [42] Morozova G S, Smith N D. Holocene avulsion styles and sedimentation patterns of the Saskatchewan River, Cumberland Marshes, Canada[J]. Sedimentary Geology, 2000, 130(1/2): 81-105.
- [43] Stouthamer E. Sedimentary products of avulsions in the Holocene Rhine-Meuse delta, the Netherlands [J]. Sedimentary Geology, 2001, 145(1/2): 73-92.
- [44] Jones H L, Hajek E A. Characterizing avulsion stratigraphy in ancient alluvial deposits [J]. Sedimentary Geology, 2007, 202 (1/2): 124-137.
- [45] Lowe D R, Graham S A, Malkowski M A, et al. The role of avulsion and splay development in deep-water channel systems: Sedimentology, architecture, and evolution of the deep-water Pliocene Godavari "A" channel complex, India[J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 105: 81-99.
- [46] Bridge J S. Large-scale facies sequences in alluvial overbank environments [J]. Journal of Sedimentary Research, 1984, 54 (2): 583-588.
- [47] Flood Y S, Hampson G J. Facies and architectural analysis to interpret avulsion style and variability: Upper Cretaceous Blackhawk Formation, Wasatch Plateau, central Utah, U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2014, 84(9): 743-762.
- [48] Gibling M R, Bashforth A R, Falcon-Lang H J, et al. Log jams and flood sediment buildup caused channel abandonment and avulsion in the Pennsylvanian of Atlantic Canada[J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80(3): 268-287.
- [49] Donselaar M E, Gozalo M C C, Moyano S. Avulsion processes at the terminus of low-gradient semi-arid fluvial systems: Lessons from the Río Colorado, Altiplano endorheic basin, Bolivia [J]. Sedimentary Geology, 2013, 283: 1-14.
- [50] 李嘉光. 干旱湖盆曲流河末端细粒沉积体系及沉积模式[J]. 地球科学,2018,43(增刊1):264-276. [Li Jiaguang. Sedimentary model of fine-grained dryland meandering river terminus systems in a semi-arid or arid endorheic basin [J]. Earth Science, 2018, 43(Suppl. 1): 264-276.]
- [51] van Toorenenburg K A, Donselaar M E, Weltje G J. The life cycle of crevasse splays as a key mechanism in the aggradation of alluvial ridges and river avulsion [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2018, 43(11): 2409-2420.
- [52] van Toorenenburg K A, Donselaar M E, Noordijk N A, et al. On the origin of crevasse-splay amalgamation in the Huesca fluvial fan (Ebro Basin, Spain) : Implications for connectivity in low net-to-gross fluvial deposits [J]. Sedimentary Geology,

2016, 343: 156-164.

- [53] 冯潇飞,赵晓明,谭程鹏,等. 深海弯曲水道内部一种特殊的 沉积单元:凹岸坝[J]. 沉积学报,2020,38(2):440-450. [Feng Xiaofei, Zhao Xiaoming, Tan Chengpeng, et al. A distinctive sedimentary element within the sinuous submarine channel: Outer bank bar[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2020, 38(2): 440-450.]
- [54] 林承焰,程盼,任丽华,等.奥里诺科重油带 MPE-3 区块 Oficina 组辫状河三角洲沉积相定量刻画[J]. 沉积学报,2019,37
  (3):610-622. [Lin Chengyan, Cheng Pan, Ren Lihua, et al. Quantitative description of the braided river delta sedimentary facies of the Oficina Formation in MPE-3 block of the Orinoco heavy oil belt[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(3): 610-622. ]
- [55] 岳大力, 胡光义, 李伟, 等. 井震结合的曲流河储层构型表征 方法及其应用: 以秦皇岛 32-6 油田为例[J]. 中国海上油气, 2018, 30(1): 99-109. [Yue Dali, Hu Guangyi, Li Wei, et al. Meandering fluvial reservoir architecture characterization method and application by combining well logging and seismic data: A case study of QHD32-6 oilfield[J]. China Offshore Oil and Gas, 2018, 30(1): 99-109.]
- [56] 蔡全升,胡明毅,胡忠贵,等.退积型浅水三角洲沉积演化特征及砂体展布规律:以松辽盆地北部临江地区下白垩统泉头组四段为例[J].石油与天然气地质,2016,37(6):903-914.
  [Cai Quansheng, Hu Mingyi, Hu Zhonggui, et al. Sedimentary evolution and distribution of sand bodies of retrogradational shallow-water delta: A case study from 4th member of the Cretaceous Quantou Formation in the Lingjiang area, Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2016, 37(6): 903-914.]
- [57] Li W, Yue D L, Wang W F, et al. Fusing multiple frequencydecomposed seismic attributes with machine learning for thickness prediction and sedimentary facies interpretation in fluvial reservoirs [J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2019, 177: 1087-1102.
- [58] 张建坤,杨国涛,吴吉忠,等. 黄骅坳陷北部马头营凸起馆陶 组砂体成因及展布特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2017,47(1):48-60. [Zhang Jiankun, Yang Guotao, Wu Jizhong, et al. Genesis and distribution characteristics of sandstone bodies in the Guantao Formation of Matouying uplift, the northern Huanghua Depression [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2017, 47(1):48-60.]
- [59] 高崇龙,纪友亮,任影,等. 准噶尔盆地莫索湾地区白垩系清 水河组沉积演化与有利砂体展布[J]. 古地理学报,2015,17
  (6):813-828. [Gao Chonglong, Ji Youliang, Ren Ying, et al. Sedimentary evolution and favorable sandbody distribution of the Cretaceous Qingshuihe Formation in Mosuowan area, Junggar Basin [J]. Journal of Palaeogeography, 2015, 17 (6): 813-828.]
- [60] Zhao X M, Qi K, Liu L, et al. Development of a partiallyavulsed submarine channel on the Niger Delta continental slope:

Architecture and controlling factors [J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 95: 30-49.

- [61] Labrecque P A, Jensen J L, Hubbard S M, et al. Sedimentology and stratigraphic architecture of a point bar deposit, Lower Cretaceous McMurray Formation, Alberta, Canada [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2011, 59(2): 147-171.
- [62] Hajek E A, Edmonds D A. Is river avulsion style controlled by floodplain morphodynamics? [J]. Geology, 2014, 42 (3): 199-202.
- [63] Gibling M R. Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record: A literature compilation and classification [J]. Journal of Sedimentary Research, 2006, 76 (5): 731-770.
- [64] Gouw M J P. Alluvial architecture of the Holocene Rhine-Meuse delta (the Netherlands) [J]. Sedimentology, 2008, 55 (5): 1487-1516.
- [65] Chamberlin E P, Hajek E A. Interpreting paleo-avulsion dynamics from multistory sand bodies[J]. Journal of Sedimentary Research, 2015, 85(2): 82-94.
- [66] 张红薇,赵翰卿,麻成斗. 泛滥一分流平原相储层中河间砂体的精细描述[J]. 大庆石油地质与开发, 1998(6): 24-26.
  [Zhang Hongwei, Zhao Hanqing, Ma Chengdou. Fine description of interchannel sandbody in flood-distributary pain reservoir
  [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 1998(6): 24-26.]
- [67] 高白水,金振奎,李燕,等. 河流决口扇沉积模式及演化规律: 以信江府前村决口扇为例[J]. 石油学报,2015,36(5):564-572. [Gao Baishui, Jin Zhenkui, Li Yan, et al. Sedimentary model and evolutionary process of crevasse splays: A case of crevasse splays around Fuqiancun village along Xinjiang River [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(5): 564-572.]
- [68] 陈薪凯,陈程,汪虎. 渤海湾盆地秦皇岛 32-X油田决口扇储层 的沉积特征与区分标准[J]. 特种油气藏,2020,27(5):22-29, 138. [Chen Xinkai, Chen Cheng, Wang Hu. Sedimentary characteristics and distinguishing criteria of crevasse splay reservoir in QHD 32-X oilfield, Bohai Bay Basin[J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 22-29, 138. ]
- [69] 黄金柱.济阳坳陷高青油田水下决口水道沉积模式及其砂体 内剩余油形成与富集[J].天然气地球科学,2008,19(1):116-119. [Huang Jinzhu. Sub-sea crevasse channel depositional model and remaining oil forming and concentration in the sand body, Gaoqing oil-filed[J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19 (1): 116-119.]
- [70] 周连德,田晓平,时新磊,等.海上大井距条件下河流相窄薄 储层预测:以渤中34-X油田北块1井区明化镇组下段V油组为 例[J].长江大学学报(自科版),2017,14(11):22-26,39.
  [Zhou Liande, Tian Xiaoping, Shi Xinlei, et al. The prediction of narrow-thin fluvial reservoirs under large well spacing condition in offshore oilfield—by taking V oil formation in the low segment of Minghuazhen Formation (N<sub>1</sub>m<sub>L</sub>) in block 1 of Bo-

zhong 34-X oilfield for example[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2017, 14(11): 22-26, 39.]

- [71] 邓庆军,张永成,裴占松,等. 萨中开发区萨二油层河间砂体 细化表征方法[J]. 复杂油气藏,2018,11(2):38-41. [Deng Qingjun, Zhang Yongcheng, Pei Zhansong, et al. Fine characterization method for interchannel sandbody in S-II layer of Sazhong oilfield[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2018, 11 (2):38-41.]
- [72] 张昌民,尹太举,喻辰,等.基于过程的分流平原高弯河道砂体储层内部建筑结构分析:以大庆油田萨北地区为例[J]. 沉积学报,2013,31(4):653-662. [Zhang Changmin, Yin Taiju, Yu Chen, et al. Reservoir architectural analysis of meandering channel sandstone in the delta plain based on the depositional process [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(4): 653-662.]
- [73] 吴胜和,纪友亮,岳大力,等.碎屑沉积地质体构型分级方案 探讨[J]. 高校地质学报,2013,19(1):12-22. [Wu Shenghe, Ji Youliang, Yue Dali, et al. Discussion on hierarchical scheme of architectural units in clastic deposits [J]. Geological Journal of China Universities, 2013, 19(1): 12-22. ]
- [74] Miall A D. The geology of fluvial deposits[M]. Berlin: Springer, 1996: 75-178.
- [75] 马世忠,孙雨,范广娟,等. 地下曲流河道单砂体内部薄夹层 建筑结构研究方法[J]. 沉积学报,2008,26(4):632-639. [Ma Shizhong, Sun Yu, Fan Guangjuan, et al. The method for studying thin interbed architecture of burial meandering channel sandbody [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2008, 26 (4): 632-639.]
- [76] 周银邦,吴胜和,计秉玉,等.曲流河储层构型表征研究进展
  [J].地球科学进展,2011,26(7):695-702. [Zhou Yinbang, Wu Shenghe, Ji Bingyu, et al. Research progress on the characterization of fluvial reservoir architecture[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(7):695-702. ]
- [77] 岳大力,吴胜和,刘建民. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖 方法[J]. 石油学报,2007,28(4):99-103. [Yue Dali, Wu Shenghe, Liu Jianmin. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river[J]. Acta Petrolei Sinica, 2007, 28(4): 99-103.]
- [78] 岳大力,吴胜和,谭河清,等.曲流河古河道储层构型精细解 剖:以孤东油田七区西馆陶组为例[J]. 地学前缘,2008,15
  (1):101-109. [Yue Dali, Wu Shenghe, Tan Heqing, et al. An anatomy of paleochannel reservoir architecture of meandering river reservoir: A case study of Guantao Formation, the west 7th block of Gudong oilfield [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(1): 101-109. ]
- [79] Bridge J S, Tye R S. Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wirelinelogs and cores[J]. AAPG Bulletin, 2000, 84(8): 1205-1228.
- [80] Edmonds D A, Hajek E A, Downton N, et al. Avulsion flowpath selection on rivers in foreland basins[J]. Geology, 2016,

44(9): 695-698.

- [81] Yalin M S. River mechanics [M]. Oxford: Pergamon Press, 1992: 219-221.
- [82] Gooley J T, Johnson C L, Pettinga L. Spatial and temporal variation of fluvial architecture in a prograding clastic wedge of the Late Cretaceous western interior basin (Kaiparowits Plateau), U. S. A. [J]. Journal of Sedimentary Research, 2016, 86(3): 125-147.
- [83] Hajek E A, Straub K M. Autogenic sedimentation in clastic stratigraphy [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2017, 45: 681-709.
- [84] Moran K E, Nittrouer J A, Perillo M M, et al. Morphodynamic modeling of fluvial channel fill and avulsion time scales during Early Holocene transgression, as substantiated by the incised valley stratigraphy of the Trinity River, Texas [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2017, 122(1): 215-234.
- [85] Grenfell S E, Grenfell M C, Rowntree K M, et al. Fluvial connectivity and climate: A comparison of channel pattern and process in two climatically contrasting fluvial sedimentary systems in South Africa[J]. Geomorphology, 2014, 205: 142-154.
- [86] Stouthamer E, Berendsen H J A. Factors controlling the Holocene avulsion history of the Rhine-Meuse delta (the Netherlands) [J]. Journal of Sedimentary Research, 2000, 70 (5) : 1051-1064.
- [87] Stouthamer E, Berendsen H J A. Avulsion frequency, avulsion duration, and interavulsion period of Holocene channel belts in the Rhine-Meuse delta, the Netherlands [J]. Journal of Sedimentary Research, 2001, 71(4): 589-598.
- [88] Tooth S, Rodnight H, Duller G A T, et al. Chronology and controls of avulsion along a mixed bedrock-alluvial river [J]. GSA Bulletin, 2007, 119(3/4): 452-461.
- [89] Larkin Z T, Tooth S, Ralph T J, et al. Timescales, mechanisms, and controls of incisional avulsions in floodplain wetlands: Insights from the Tshwane River, semiarid South Africa [J]. Geomorphology, 2017, 283: 158-172.
- [90] 张昌民,朱锐,尹太举,等.扇三角洲沉积学研究进展[J].新 靈石油地质,2015,36(3):362-368. [Zhang Changmin, Zhu Rui, Yin Taiju, et al. Advances in fan deltaic sedimentology [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(3): 362-368.]
- [91] 张昌民,朱锐,赵康,等.从端点走向连续:河流沉积模式研究 进展述评[J]. 沉积学报,2017,35(5):926-944. [Zhang Changmin, Zhu Rui, Zhao Kang, et al. From end member to continuum: Review of fluvial facies model research[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2017, 35(5): 926-944. ]
- [92] 唐武,王英民,赵志刚,等. 河型转化研究进展综述[J]. 地质 论评,2016,62(1):138-152. [Tang Wu, Wang Yingmin, Zhao Zhigang, et al. A review of fluvial pattern transformation [J]. Geological Review, 2016, 62(1): 138-152. ]
- [93] 谭程鹏,于兴河,李胜利,等. 辫状河一曲流河转换模式探讨: 以准噶尔盆地南缘头屯河组露头为例[J]. 沉积学报,2014,32

(3):450-458. [Tan Chengpeng, Yu Xinghe, Li Shengli, et al. Discussion on the model of braided river transform to meandering river: As an example of Toutunhe Formation in southern Junggar Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 450-458.]

 [94] 李胜利,于兴河,杨志浩,等. 准噶尔盆地彩南地区头屯河期 河流变迁与砂体展布[J]. 新疆石油地质,2015,36(6):660-667. [Li Shengli, Yu Xinghe, Yang Zhihao, at al. Fluvial changes and sandbody distribution of Toutunhe Formation in Cainan area, Junggar Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2015, 36(6): 660-667. ]

[95] 赵晨帆,于兴河,付超,等.曲流河三角洲一辫状河三角洲控制因素及演化过程探讨[J]. 沉积学报,2019,37(4):768-784.
[Zhao Chenfan, Yu Xinghe, Fu Chao, et al. Control factors and evolution progress of depositional system transition from meandering river delta to braid river delta: Case study of Shan2 member to He8 member, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2019, 37(4): 768-784.]

# Avulsion: A Review and Discussion of Key Points in Channel Evolution

CHEN XinKai<sup>1,2</sup>, ZHOU ShuXun<sup>1,2</sup>, XIN HongGang<sup>1,2</sup>, LI Cheng<sup>1,2</sup>, LI WeiCheng<sup>1,2</sup>, FENG ShengBin<sup>1,2</sup>, MAO ZhenHua<sup>1,2</sup>, ZHU LiWen<sup>1,2</sup>, LI Chi<sup>1,2</sup>, YIN LiangLiang<sup>1,2</sup> 1. National Engineering Laboratory for Exploration and Development of Low-Permeability Oil & Gas Fields, Xi'an 710018, China 2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina Changqing Oilfield Company, Xi'an 710018, China

Abstract: Studies on avulsion have been conducted in geology, geomorphology, hydrology and other fields, but it has not received sufficient attention from domestic sedimentologists. Based on the sorting of relevant controversial issues, the key issues concerning the concept, genesis, evolution, identification, and application of avulsion are reviewed and discussed. The main results include : (1) the concept of avulsion, the similarities and differences between avulsion, crevasse splay and diversion, and the narrow definition of avulsion can explain large-scale river diversion. (2) Clear slope ratio is the main control factor of avulsion, and the anti-flood property of natural levees (sandy or muddy) and the geomorphic characteristics of flood plains (surface vegetation, water level, drainage condition, and abandoned river) are the secondary control factors. (3) The evolution model and identification criteria of avulsion are summarized, and a classification suitable for reservoir sedimentology is proposed. Sedimentologists in China should identify different channel types and evolution models by using avulsion accompanied by reoccupation and crevasse-splay deposits to distinguish fluvial evolution or use the models of stratigraphically transitional and abrupt avulsion to distinguish the superposition between channel sand bodies. (4) The application prospect of avulsion in current significant research focuses such as reservoir architecture and river transformation is discussed. The concept of avulsion should be introduced to improve the five-level evolution in reservoir architecture, the establishment of a geological knowledge base of large-scale fluvial system, and the influence of heterocyclic cycles on reservoir architecture. Sedimentary models of intertransformation were proposed between a large single channel and network channel in supplementary fluvial transformation. The review and discussion on avulsion not only enriches the current domestic theory of fluvial facies deposition, but also provides a more scientific basis for reservoir sedimentologists to restore the evolution mode of ancient channels and establish more accurate geological models.

**Key words**: avulsion; channel evolution; crevasse splay; architecture; superimposed sand body; channel pattern transition; meandering river; diversion