

文章编号:1000-0550(2017)05-0926-19

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.05.006

# 从端点走向连续:河流沉积模式研究进展述评

张昌民,朱锐,赵康,胡威,尹艳树,李少华,尹太举

长江大学地球科学学院,武汉 430100

**摘要** 从河道类型的划分、河床演变与河型转换、河道沉积与河流砂体的建筑结构要素、河漫滩沉积、季节性河流与分支河流体系、河流沉积相模式、河流沉积学研究技术与方法等方面对国内外河流沉积模式的研究进展进行了综述,认为近十年来河流沉积学的理论和方法都发生了重要的变化。地貌学家、沉积学家和工程师认识到河道形态是连续可变的,而不是只有4~40多个端点类型。河床的演变受河床比降、流量变幅、河岸沉积物粒度构成、气候、植被以及构造沉降速率等多方面的影响。垂向剖面分析法难以对古河流类型做出正确的判断,运用建筑结构要素分析法重建河道内大型底形的地貌形态是河型判别和河流相模式重建的正确方法。河漫滩是河流沉积事件记录最为齐全的部位,对河漫滩、天然堤和泛滥平原沉积层序的研究能够揭示更多古河流沉积过程以及古环境、古气候和古生物方面的信息。对季节性河流、受季风强烈影响地区的河流、以及不同气候带河流所发育的独特沉积构造和建筑结构要素的研究不断增加。分支河流体系的概念得到越来越多的应用,但也得到不少质疑。我国学者应当注重对现代河流地貌形态和沉积过程的观察,把河床演变学的定量方法与沉积学的观点、理论和资料相结合,利用露头、三维地震资料和探地雷达技术建立河流砂体内部建筑结构信息数据库,加强对古河流河漫滩和泛滥平原的沉积过程、特征及其控制因素的研究,加强对不同构造和气候条件下河流沉积的差异性研究,不断发展河流沉积学研究技术,加强河流沉积学实验室建设和研究队伍建设,加强国际交流与合作,使我国河流沉积学为国家经济社会发展提供更加有力和有效的支撑,为推动国际河流沉积学发展做出中国人自己的贡献。

**关键词** 河流;河流沉积学;河道;建筑结构要素;相模式;综述

**第一作者简介** 张昌民,男,1963年出生,博士,教授,沉积学与石油地质学,E-mail: zcm@yangtzeu.edu.cn

**中图分类号** P512.2 **文献标识码** A

“三十年河东,三十年河西”可能是最早关于河流沉积模式的精辟概括,但现代河流沉积相模式的研究始于上世纪60年代的沉积学革命,从曲流河<sup>[1]</sup>与辫状河<sup>[2]</sup>沉积模式的提出,到网状河沉积模式的推广<sup>[3-5]</sup>,直到上世纪80年代中期建筑结构要素分析法<sup>[6]</sup>的兴起,河流沉积学不断发展。近20年来,河流沉积学研究理论和方法取得了一些重大进展,从对端点河型的解剖到对控制河道形态和建筑结构变化的多因素分析,人们逐渐认识到河流不仅仅只有四种类型<sup>[7-10]</sup>,不同河道类型在时间空间上既可以共生,也可以相互转换<sup>[11-14]</sup>。沉积学家对发育在不同气候带和构造背景的河流及其沉积物的研究不断增多,分支河流体系得到越来越多的关注。中国河流沉积学家积极跟踪国际河流沉积学进展,做了大量创新性工作。本文从河道类型的划分、河床演变与河型转换、河道沉积与河流砂体的建筑结构分析、河漫滩沉积、季节性河流与分支河流体系、河流沉积相模式、河流

沉积学研究技术与方法等方面介绍了国内外河流沉积模式研究的进展,对我国河流沉积模式研究领域与国际上的差异性进行比较分析,为我国河流沉积模式研究的未来发展提出了建议。

## 1 河型分类

大多数沉积学家和地貌学家通常把河流分成顺直河、曲流河和辫状河,Brice<sup>[15]</sup>进一步区分了稳定的等宽度的曲流河、不稳定弯道变宽的点坝发育的曲流河、点坝发育的辫状河和点坝不发育的辫状河之间的差异,并指出每一种河流都具有对应的多河道体系。Bridge<sup>[9,16]</sup>把网状河定义为河道带而不是一种特殊的河流。Schumm<sup>[17]</sup>认为河谷坡降、河道宽深比、河道弯度以及河道内沙坝的类型与河流沉积物的粒度有关,他依据沉积载荷类型和河道形态对河流进行分类,其分类中不包括网状河。

地貌学家、工程师和沉积学家都注意到河道形态

收稿日期:2016-12-07; 收修改稿日期:2017-06-16

基金项目:国家自然科学基金项目(41772094,41302096);国家科技重大专项(2016ZX05027-002-007)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41772094, No.41302096; National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05027-002-007]

的复杂性,认为冲积河道平面形态的变化是连续而不是离散的<sup>[8-9,11-12,17]</sup>,天然河道的平面形态是相互过渡的,河道沉积物的粒度变化是连续而没有截然分界的,河道沉积物的粒度变化是连续而没有截然分界的,有些河道在某一段同时具有曲流河、辫状河甚至网状河的特征,比如新西兰南岛的 Waimakariri 河(图 1)。Rosgen<sup>[7]</sup>将河道细分成大约四十多种类型;Van den Berg<sup>[18]</sup>收集了 192 个现代河流的 225 组数据,利用水流功率与床沙物质平均粒径的关系来划分辫状河和曲流河,发现两种河道都具有非常宽的平均粒径范围;Tooth *et al.*<sup>[19-20]</sup>研究认为辫状河到曲流河转换的经典判别图不适用于澳大利亚干旱地区的季节性河流。

我国学者较多使用 4 端点的河型分类体系<sup>[8,21-22]</sup>,但水利和地貌学家对河型的多变性给予了更多的关注。王随继等<sup>[23]</sup>认为分汊河与网状河在沉积特点上具有明显的差异;解哲辉等<sup>[24]</sup>将黄河的游荡性河段与辫状河段进行了对比,认为游荡河型主要发育于能量小于输沙需求的环境,河道形态不稳定,辫状河型不仅出现在能量较强的环境,而且也常在能量较弱的环境中出现,这一观点虽然过分强调一种特殊类型的“辫状河”的特征,然而也提醒沉积学家关注地质历史中曾经出现过的“古老的黄河”;张俊勇等<sup>[25]</sup>认为河型研究不仅需要对比力学河流进行分析和

研究,也需要对河流系统及功能、局部及整体、因素与结果做全面科学的认识和掌握;罗昌洪等<sup>[26]</sup>认为理想的河型判别式应该具有河型判别、河型预测和河型控制的功能;陶杰等<sup>[27]</sup>提出了河型自然分类方法,并对冲积河流河型的形成原因进行了推理;史传文等<sup>[28]</sup>以实用冲积河流稳定程度方式为依据,通过模糊聚类和判别分析建立河型分类判别模式;何建新<sup>[29]</sup>采用多元线性回归分析法建立了塔里木河干流河型判别式,发现新疆干旱内陆河与内地湿润地区河流的河型成因及河道演变规律在本质上是一致的;余文畴<sup>[30]</sup>认为下荆江河道具备抗冲性适度的二元结构,河流选择加大河长耗散富余能量形成高弯曲度曲流河道,而城陵矶以下长江中下游河道河岸二元结构上层黏性土层较薄,抗冲性很弱,河道变宽发育心滩进而演化为江心洲,形成分汊型河流;何萍等<sup>[10]</sup>认为“河流分类体系不断走向系统与综合,体现在从单要素到多要素、从定性到定量、从结构到过程、从单尺度线状河流到多尺度等级系统,以及从自然系统到包含社会价值。随着河流生态学实验及理论的发展、多学科的合作以及多尺度数据源条件的改善,具有预测功能的分类体系将逐步取代描述性的分类体系”。这一观点不仅适合于对河型的分类,同样适合于整个河流沉积学研究领域甚至沉积学研究领域的发展趋势。

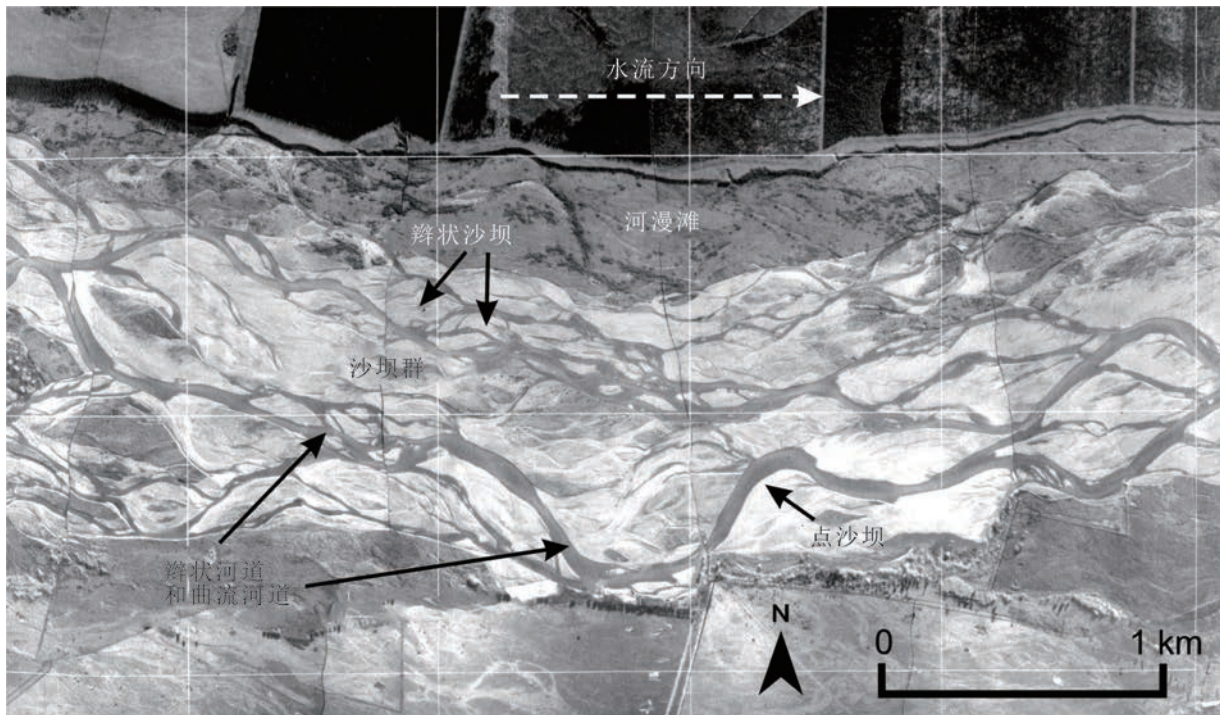


图 1 新西兰南岛 Waimakariri 河中的复杂河流体系,包括辫状河、曲流河和网状河(据 Ethridge, 2011 修改)

Fig.1 Complex system of Waimakariri River, south island, New Zealand. The photo shows braided, meandering and anastomosing channel in the same section (modified from Ethridge, 2011)



## 2 河型转换与河床演变

哲学家曾对河流的演变做了精辟的概括,论语《子罕》篇记载:“子在川上曰,逝者如斯夫,不舍昼夜。”说明逝去的光阴就像流过的水流一样,也表明了河流变化的迅速。赫拉克利特(Heraclitus, 约公元前530年—前470年)说:“人不能两次踏进同一条河流”,说明人们早就认识到河流在不断地变化,河型转换与河床演变在时间和空间上都表现出连续性和多样性的特点。河道的变化受构造背景、源区岩性、流域气候、基准面升降、河道长度、支流汇入、河谷形态、季节性洪水和植被等因素的控制<sup>[11-12]</sup>。Leeder<sup>[31]</sup>强调构造掀斜引起河道梯度变化导致决口、河道迁移和下切;Schumm *et al.*<sup>[11]</sup>认为沿着亚马逊河在巴西的河段,当河流穿越构造高点时,地表水梯度增加,河流下切河谷变窄河道变直,在这些高点的下游,梯度变缓河谷变宽,发生大规模的河道决口,河流分叉发育涡流沙坝;Fotherby<sup>[13]</sup>研究了美国列克星敦和查普曼之间普拉特河的11个河段,其中最上游的两个河段呈曲流型和游荡型,其他9个河段呈辫状河、具有辫状特点的网状河或者具有网状特点的辫状河特征;Lunt *et al.*<sup>[32]</sup>利用航空照片研究发现阿拉斯加北部 Sagavanirktok 河在1949—2001年之间从曲流河变成辫状河,河流形态在短期内发生如此巨大的变化,证明同一古代河流沉积物中完全有可能含有多种不同形态的河流沉积。

由于工程建设的需要,水利工程师和地貌学家较

为关注河流的即时变化。许炯心和师长兴<sup>[33-34]</sup>研究了老哈河红山水库上游河漫滩地生态系统变化引起的河型转化;张红武等<sup>[35]</sup>将河床的综合稳定性指标  $Z_w$  作为区分河型的判别指标,当  $Z_w < 5$  时为游荡型;当  $5 < Z_w < 15$  时为分叉型;当  $Z_w > 15$  时为弯曲型;舒安平<sup>[36]</sup>通过实验模拟发现由可动砾质河床构成的天然河流,当上游水沙条件保持不变时,雍水使水面比降变缓河床趋向窄深,当水流与河床相互调整到一定阶段,水面比降进一步减小触发分叉型向单一河道河型转化;金德生<sup>[37]</sup>基于地貌过程的响应模型设计了不同的实验,分析边界条件及地貌条件对河型变化的影响;周刚等<sup>[38-39]</sup>根据平面二维河流数学模型,模拟得出当初始比降、流量、入口含沙量增大和河岸抗冲性减弱时,河流从弯道向分叉、游荡型河床转化;倪晋仁<sup>[40]</sup>认为河型转换的模式可以概括为5种:1) 辫状河—曲流河;2) 直流河—曲流河;3) 曲流河—辫状河;4) 曲流河—分叉河;5) 分叉河—直流河。河道类型主要受河道比降、粗颗粒沉积物含量、来水来沙大小和变幅、河岸抗冲性和泥质含量的影响;河型转换受河道比降、流量变幅、河岸粗粒沉积物含量、气候、植被以及构造沉降速率的影响(图2)。

在沉积地质学方面,赖志云<sup>[41]</sup>在研究荆江段的现代沉积时注意到每一个重力高处河道窄而且平直,在它的下游出现心滩。认为这种现象是由于基底的不断隆起,河流流经隆起处,表现为强烈的底蚀作用,河道狭窄,紧接着河水进入下陷区,坡降变缓,河流以侧蚀作用为主,河面加宽流速变慢,挟沙能力减弱,把

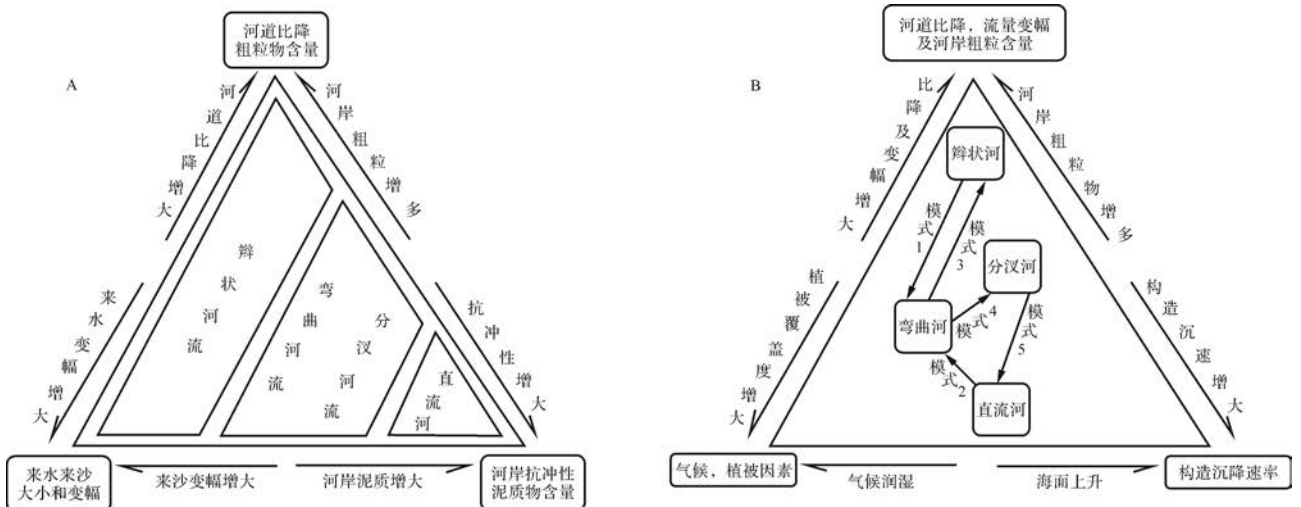


图2 河型转换——影响因素与转换方式(据倪晋仁等,2000修改)

A.河道类型及其影响因素;B.河型转换模式及其影响因素

Fig.2 Controlling factors and processes of channel patterns transition (modified from Ni *et al.*, 2000)

A. controlling factors and types of channel; B. controlling factors and processes of channel patterns transition

所搬运的泥沙沉积下来,在横向环流的作用下形成心滩;王随继<sup>[42]</sup>研究了大同盆地中侏罗世河流沉积体系与古河型演化问题;刘朋远等<sup>[43]</sup>认为松辽盆地东南缘籍家岭泉头组露头0~28 m发育冲积扇相,28~70 m发育辫状河相,70~510 m发育曲流河相;唐武等<sup>[44]</sup>对河型转化的研究进展进行了综述,列举了一些我国沉积地质工作者对河型演化的认识<sup>[45-46]</sup>;谭鹏程等<sup>[47]</sup>通过野外露头解剖,认为随着基准面的逐渐升高,物源供给减弱,地形坡度减缓,古气候环境炎热干旱,准噶尔盆地南缘头屯河组逐渐由辫状河向曲流河转换;李胜利等<sup>[48]</sup>通过露头解剖揭示了辫状河向曲流河转变的过程。与国际上相比,国内水利工程领域比较注重河床演变和河型转换问题的研究,我国河流沉积学家在河型转换方面还需要做更多的工作。

### 3 古河道沉积与砂体建筑结构

Allen<sup>[49]</sup>在研究老红砂岩时使用建筑结构要素这一概念,Miall将这一技术标准化和编码,进行界面级别、岩石相和结构要素的识别和组合<sup>[6,50-51]</sup>,用以表征河道砂体中大型底形的形态特征,重建河流沉积模式,这一技术尽管也受到一些批评<sup>[52-53]</sup>,但已得到广泛应用。Miall<sup>[6]</sup>利用建筑结构要素分析法把河流沉积模式从4种端点类型扩展到12种河流沉积模式,最早开始了从端点模式到多河型模式的研究。在利用二维或者三维露头,测量河道宽度、深度、曲率半径、河曲波长、河曲振幅、弯度、侧积面的平面延伸范围以及曲流带宽度等参数可以确定古河道的尺寸和形态方面,Nami<sup>[54]</sup>,Padgett和Ehrlich<sup>[55]</sup>以及Smith<sup>[56]</sup>等分别介绍了如何从英国侏罗纪曲流带,摩洛哥石炭纪曲流带和南非二叠系曲流带沉积物中判别河流的特征。Willis<sup>[57]</sup>将层系界面上凹、双侧向加积、向上游和向下游倾斜的低角度层系组界面、单个河道中大量的沉积单元、每个单元中古流向变化较小以及粗粒河道充填等特点解释为辫状河道沉积。因为三维河流沉积露头极少,研究人员利用与平均古流向呈一定角度的不同走向的二维露头来确认大型底形的建筑结构,判断古河道的形态,推测古河道和河道带的参数<sup>[58-60]</sup>。研究最深入的地层单元之一是巴基斯坦Potwar高原中下中新统Siwalik群<sup>[57,61-62]</sup>,研究者从三个地区沿着现代河流详细描述了长达4 000 m的二维剖面中各种层次的沉积现象。

为了建立储层地质模型,我国储层沉积学工作者开展了大量的沉积建筑结构研究工作。在露头表征

方面,杨丽莎等<sup>[63]</sup>建立了山西大同侏罗系云岗组砂质辫状河泥岩分布模式;陈彬涛等<sup>[64]</sup>在同一露头上共识别出7种岩相类型和5种构型单元;印森林等<sup>[65]</sup>在准噶尔盆地西北缘扎伊尔山黑油山沟剖面克拉玛依组识别出8种典型岩相,8个5级储集体构型单元以及2个3级储集体构型单元;金振奎等<sup>[66]</sup>对山西柳林、陕西延安和延长以及新疆阜康等四个地区的二叠系、三叠系、侏罗系辫状河砂体构型进行比较研究,指出辫状河单河道砂体宽度多为100~300 m,厚度多为2~5 m,由单河道拼合叠置形成的复合河道砂体厚度多为5~10 m,宽度多为1 000~3 000 m,总体呈板状;付晶等<sup>[67]</sup>通过露头描述认为鄂尔多斯盆地延长组浅水三角洲上的主干分流河道、汉道和末端分流河道存在侧向拼接—垂向切叠式、侧向拼接—垂向叠加式和孤立式3种复合叠置样式;朱卫红等<sup>[68]</sup>发现塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组露头发育分流河道和分流砂坝两种基本的4级构型单元,他们在垂向上构成3种组合叠置样式,在侧向上形成4种拼接样式。

在利用地下地质信息进行砂体解剖方面,白振强等<sup>[69]</sup>研究认为大庆萨北油田主力油层曲流河砂体单—河道宽度为200~800 m,点坝长度为120~500 m,侧积夹层倾角为7°~10°;张存才等<sup>[70]</sup>获得大庆油田北三区西部曲流河储层的侧积夹层倾角在5°~10°之间,侧积夹层水平间距为25~30 m,侧向延伸距离小于80 m。在胜利油田垦71断块、冀东油田柳赞南区L25-26井区、吉林油田杨大城子油层和大港油田一区一断块等油田区块也开展了类似的研究<sup>[71-75]</sup>。牛博等<sup>[76]</sup>在大庆油田萨中密井网区P1-3小层识别出心滩坝、砂质填充河道、砂泥填充河道、泥质填充河道等4种微相类型,划分了6级构型界面,提出了具有“心滩纵向平缓前积、横向多期增生体加积”特点的辫状河储层构型模式(图3)。相对于曲流点坝,对辫状河的储层建筑结构研究较少。

近10年来,虽然我国沉积学和石油地质学工作者开展了大量的露头调查和现代河流沉积建筑结构研究工作,但类似于滦平露头<sup>[77-78]</sup>的大规模系统性研究并不多见。近年在结合地下地质数据进行砂体内部建筑结构的定量表征方面做了大量的工作,这一方面走在世界的前列,但由于缺乏详细的地质知识库,所建模型仍然难以摆脱传统的沉积模式的制约,对辫状河建筑结构的认识过于拘泥于心滩坝模式,对曲流河的研究过于集中在点坝模式,多类型和多河型



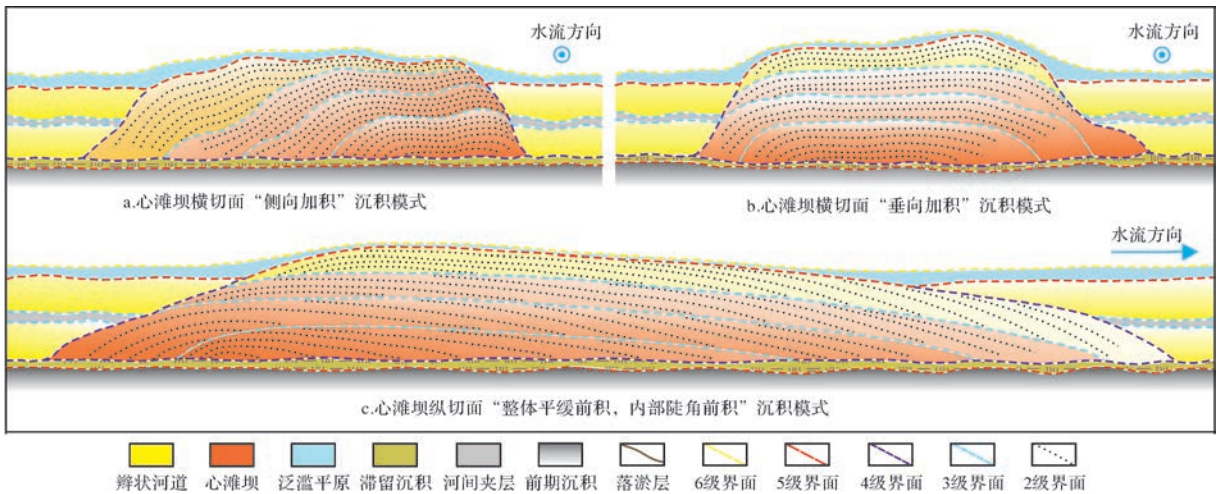


图3 辫状河构型界面与沉积模式(据牛博等,2015 修改)

Fig.3 Architectural boundary surfaces and depositional model of braided river (modified from Niu *et al.*, 2015)

共生的理念在建筑结构解剖研究中还没有形成。

## 4 河漫滩沉积

河漫滩地区沉积速率较小,沉积环境相对稳定,河漫滩沉积中包含了丰富的古河流、古环境、古气候和古生物方面的信息。研究现代河漫滩沉积物中的洪水记录为研究地质历史上的洪水事件、判别河流类型提供了可供对比的尺度和研究方法,对于了解人类世以来的环境变迁和气候事件具有重要的意义。张凌华和张振克<sup>[79]</sup>认为现代河漫滩沉积形成的时间尺度约为 $10^0 \sim 10^2$  a。例如,美国普拉特河一个厚约350 cm的现代河漫滩层序记录了自欧洲人定居美洲以来(约1 830 a)14次大洪水和至少3个时期的人类采矿活动的沉积记录;黄河从官亭盆地进入寺沟峡的二级阶地上厚约2 m的河漫滩沉积记录了发生在3 700~2 800 a B.P.间的14次特大洪水。王长燕等<sup>[80]</sup>在兰州市西郊黄河北岸选取了一个厚约1.25 m的研究剖面,采集了60个粒度样品,分析认为黄河兰州段140 a来发育了10次大小不同的洪水,推测剖面第4层为1904年的洪水沉积,代表的最大洪水流量为 $8\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 。赵景波等<sup>[81]</sup>将陕西眉县渭河大桥西侧1.9 m厚的河漫滩沉积剖面划分为16层,通过94个样品的粒度分析判断渭河120 a来发育了16次洪水,将渭河中下游地区近250 a来洪水发生频次与太阳黑子数以及我国东部地区温度变化进行对比,发现当太阳黑子数多的时期,我国东部地区温度较高,研究区渭河洪水发生频次较少;当太阳黑子数少的时期,我国东部地区温度较低,研究区渭河洪水发生频

次较高(图4)。牛俊杰等<sup>[82]</sup>和周岳等<sup>[83]</sup>采用相同的方法分别对西安北郊和西安东郊的渭河河漫滩沉积与洪水的关系进行了研究。

河漫滩沉积常见的构造为水平层理、波状层理和爬升层理,也发育暴露成因构造、生物遗迹构造,这些构造特征是划分洪水单元的重要标志。不同地方的河漫滩沉积构造不同,有些水平层理的单层厚度可达几十厘米以上,有些水平层理的单层厚度以毫米计。西班牙中部的Tagus河发育向上游迁移的爬升层理,长江三峡等许多山地丘陵河段的砾石滩表面发育叠瓦状构造,在河谷谷坡洞穴、凹壁中的河漫滩沉积主要发育平行层理,洪水期快速堆积的厚层河漫滩沉积单元内部没有明显的构造特征。

沉积地质学家对河漫滩沉积层序关注不足,有限的研究显得十分珍贵。郑文波和邓宏文<sup>[84]</sup>在大庆长垣区下白垩统泉头组扶余油层的溢岸沉积中识别出6种岩石相,构成了决口河道、决口扇、决口扇复合体等3种沉积微相,他们认为在河流相地层内,随着基准面的上升,溢岸沉积发育程度逐渐增加,溢岸沉积厚度和平面展布范围逐渐增大;随着基准面的下降,溢岸沉积厚度和展布范围逐渐减小。沉积学应当加强对古沉积记录中河漫滩和泛滥平原沉积层序的研究。

地理学家很早就注意到河漫滩体系的形成发育机理问题,并认为河漫滩的发育随流域气候变化呈连续的有规律的演变。为了定量地刻画河漫滩的发育过程,许炯心<sup>[85]</sup>提出了一个发育指标:

$$I_1 = H_u / H_1$$

式中, $I_1$ 为河漫滩发育指标,表示河漫滩的垂向生长

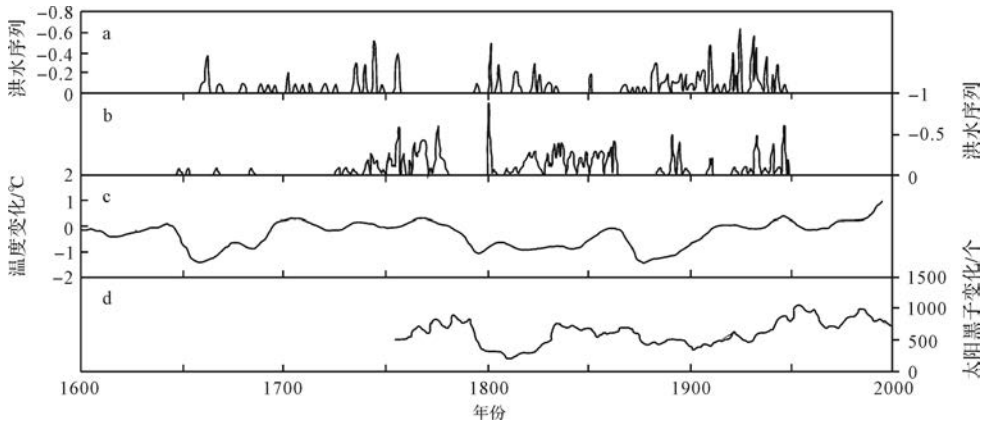


图4 关中渭河和泾河洪水历史文献记录与中国东部地区气温变化记录以及250年以来太阳黑子变化对比图 (据赵景波等,2010)

a.关中渭河洪水序列;b.泾河流域洪水序列;c.历史文献恢复的中国东部气温变化;d.250年以来太阳黑子变化

Fig. 4 Historical floods records of Weihe River(a) and Jinghe River(b) with comparison to the historical literature calculated temperature vibration of East China(c) and the sunspots variation(d) (from Zhao *et al.*, 2010)

量与侧向生长量之比; $H_u$ 及 $H_l$ 分别为一个河漫滩二元结构层组上层河漫滩相沉积物的厚度及下层河床相沉积物的厚度。若 $I_f > 0.6$ ,则为垂向加积型;若 $0.3 < I_f < 0.6$ ,则为过渡型;若 $I_f < 0.3$ ,则为侧向加积型。曲流河的河漫滩多表现为垂向加积,具有较大的 $I_f$ 值;江心洲型河流的河漫滩表现为垂向加积型和过渡型,个别情况也可能出现侧向加积型;游荡型河流的河漫滩多为侧向加积型。许炯心<sup>[85]</sup>用流域干燥指标(某一流域的多年平均实际蒸发量与降雨量之比)作为流域的气候因子,建立了我国8条主要河流平原段的河漫滩发育指标 $I_f$ 值与流域干燥指标 $I_d$ 值之间的关系(图5)。流域干燥指标 $I_d$ 值较大时,河漫滩发育指标 $I_f$ 值较小,河流水少沙多洪峰猛涨猛落,河床极不稳定,处于强烈的淤积状态,河道侧向摆动十分迅速,河漫滩表面来不及充分加积;流域干燥指标值较小时,河漫滩发育指标值较大,河流径流丰沛含沙量低,流量过程的年际及年内变化相对较小,河床处于准平衡状态,稳定程度较高,侧向移动较慢,河漫滩得以稳定发展。

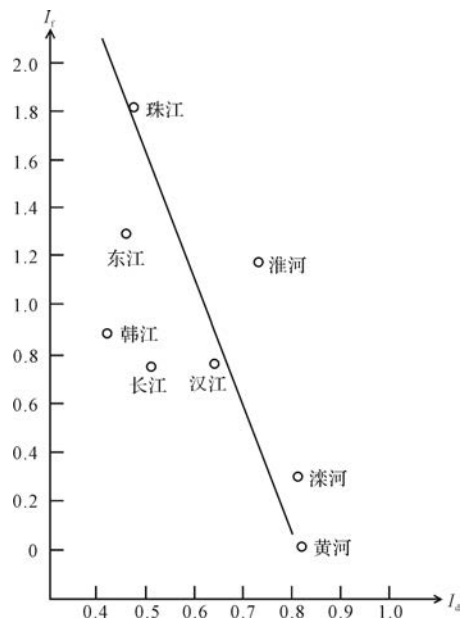


图5 我国一些河流的河漫滩发育指标与流域干燥指标的关系(据许炯心,1991)

Fig.5 Relationships between terrace development index and aridity index of drainage basin of some rivers of China (from Xu, 1991)

### 5 季节性河流与分支河流体系

气候环境对河流的影响研究是近年来河流沉积学研究的一个新动向,对季节性河流、受季风强烈影响地区的河流、以及不同气候带发育的河流的研究已经超越了传统的围绕端点河型进行的分析,正在通过河流沉积物的特征寻找各种古气候、古构造和古环境的信息,一些学者还研究了动植物对河流沉积的影

响<sup>[86-87]</sup>。

Fielding *et al.*<sup>[88]</sup>认为“热带和亚热带纬度的半湿润和半干旱季节性河流的沉积特征可能与先前发表的基于其他气候背景的相模型中所述的沉积特征非常不同”(图6)。他根据澳大利亚东北部现代河流的特征,总结出此类河流五个方面的特点:1)河道充填沉积底部发育侵蚀面,侧向相变十分复杂;2)河道充



填沉积物中发育大量泥质沉积,有些被土壤化改造;3)缺乏其他类型河流中发育的具有复杂内部结构的大型底形所形成的建筑结构要素;4)高流态成因的沉积构造很发育且保存概率很高;5)树木和其他植物适应偶发洪水的影响,可以在河床上生长,影响了河道水流方式,形成了不同的沉积物类型。Piret<sup>[89]</sup>认为从季风降水获得大量地表水供应的河流具有明显的季节性洪水特征,此类河流流量随季节变化极大,强烈的降雨导致夏季发育高强度洪水,而在干燥的冬季只在河道底部有水流通过。受季风强烈影响的河流中发育平行层理、逆行沙丘层理等过渡流态和超临界流态的沉积构造,发育高沉积速率的沉积构造,河道内部泥质沉积物丰富,常见厚层的软沉积碎屑砾石,频繁出现大规模的软沉积物变形构造,河道内有树木和植被发育并形成与植物有关的沉积构造,河道沉积物中遗迹化石发育。在此类河道中,经常发育洪水形成的建筑结构要素,大型河道底形不发育,常见决口扇沉积。

我国学者从水文、地貌和第四纪沉积物方面对现代季节性河流进行了较多的研究<sup>[90-92]</sup>,但是从沉积学角度对古代季节性河流沉积物进行的研究较少。李华启等<sup>[93]</sup>根据柯克亚凝析气田中新统西河甫组缺

少植物根迹、没有含煤地层、河漫滩亚相中缺少沼泽微相、存在异常水流活动、发育洪水重力流作用的沉积构造、存在能反映干旱气候下季节性河流的遗迹化石组合等特征,认为该套地层为干旱气候下的季节性河流沉积。梁俊红等<sup>[94]</sup>认为义县盆地早白垩世义县组沉积时期气候为干旱型,受季节性洪水作用,发育盆地边缘洪(冲)积扇相,向盆地中心过渡为季节性河流相沉积。高志勇等<sup>[95]</sup>结合中国西部现代季节性河流的水文特点,通过露头调查认为,库车河剖面下白垩统巴西改组沉积时期,库车前陆盆地发育面积较大的宽浅型湖泊,天山前发育的季节性河流流入湖泊后形成季节性河流三角洲。巴什基奇克组沉积时期,库车河一带发生了构造抬升剥蚀,湖平面下降导致在古天山前出现了多个小型湖泊,天山前季节性河流沉积大规模出现,河流进入小型湖泊后也可形成大量的小型季节性河流三角洲。高志勇等<sup>[96]</sup>还总结了古代季节性河流所具有的9个方面的特征。

现代遥感遥测技术的进步使得地理和地质学家可以在更大尺度上观察沉积体系的整体形态和规模。Weissmann *et al.*<sup>[97]</sup>和 Hartley *et al.*<sup>[98]</sup>使用 Google Earth 软件、卫星光谱雷达图像解译技术(MODIS)以及航天飞机雷达地形测量(SRTM)技术对全球724

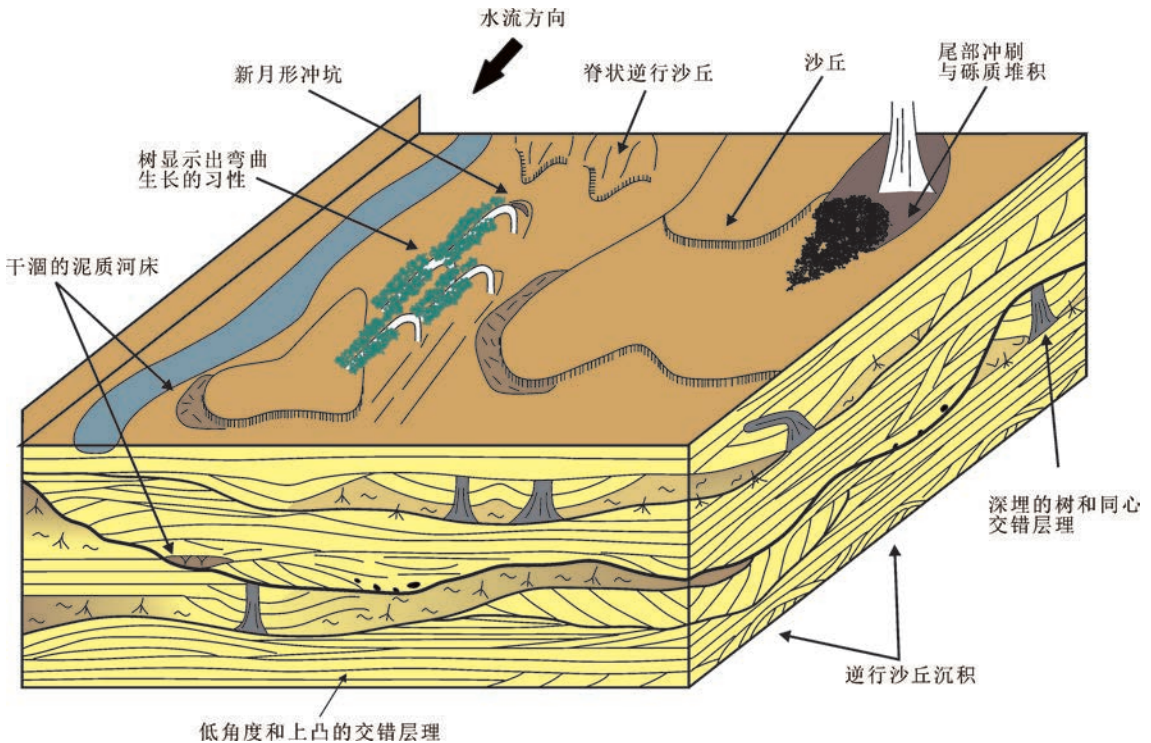


图6 热带和亚热带地区季节性河流基本建筑结构要素与相模式(据 Fielding *et al.*, 2009 修改)

Fig.6 Essential elements and the facies model of the strongly seasonal tropical and subtropical fluvial system

(modified from Fielding *et al.*, 2009)

个沉积盆地的分支河流体系(Distributive Fluvial System,以下简称DFS)进行了测量,统计的DFS的规模从小于1 km到大于700 km,认为DFS是陆相盆地中主要的沉积体系,河流只分布在DFS的下切谷、DFS之间以及DFS和盆地的边缘之间的地区(图7)。DFS的基本特点是:有明显的顶点,冲积体系从顶点无限制地进入沉积盆地;节点以上的河道淹没在下切谷内,节点以下的河道在活动朵体上散布开来;其横剖面呈上凸状、纵剖面呈下凹状;DFS上河道的形态可以是辫状也可以是曲流河;DFS上的河流并不是每一条都在同时活动,他们也可以分叉。Hartley *et al.*<sup>[129]</sup>把DFS上河道划分为六种类型:1)单个辫状河;2)向下游分叉的单个辫状河道;3)单个辫状河向下游变为曲流河;4)大型曲流河道体系;5)单个曲流河向下游分叉变成小型曲流河;6)多个曲流河道。DFS的末端可以汇入轴向河流体系或转化为轴向河流体系,也可以终止在海岸、湖泊、干盐湖、沙丘或者湿地中。DFS的概念也受到一些学者的质疑<sup>[99]</sup>,但已经有越来越多的学者接受并使用这一概念<sup>[100-101]</sup>。现代分支河流体系在我国西部大型沉积盆地边缘广泛分布,开展对西部地区现代DFS的调查不仅对解决当地的农田水利建设、土地利用、资源调查、环境评估、人口分布等经济社会发展问题具有重要推动作用,对解释西北地区前陆盆地含油气沉积体系也具有现实的意义。

## 6 河流沉积模式

关于河流相模式的评论很多<sup>[16,52-53,102-104]</sup>,包括一些教科书<sup>[9,51]</sup>。Ethridge<sup>[105]</sup>认为,曲流河相模式的概念起始于对曲流河侧向加积和向上变细旋回的研究,对辫状河的相模式的研究开始于Doeglas<sup>[2]</sup>的工

作;Bluck<sup>[106]</sup>和Jackson<sup>[107]</sup>分别研究了现代的Endrick和Wabash河,发现所形成的沉积岩相序列的变化取决于弯道迁移的特征和该序列在弯道中所处的位置,表明只用一个垂向剖面很难识别曲流河点坝沉积物;Jackson<sup>[108]</sup>认为作为曲流河判别依据的 $\epsilon$ 交错层理并不一定出现在所有曲流河沉积物中,也可以出现在非曲流河中;Collinson<sup>[109]</sup>认为没有一个垂向序列能够代表某种特殊的河道;Allen<sup>[49]</sup>通过对老红砂岩研究后认为侧向加积是辫状河局部的重要特征,砾石核的存在引起砂质堆积形成河道沙坝,侧向加积层理欠发育不能作为解释河道类型的可靠指标;Harvey *et al.*<sup>[110]</sup>研究了科罗拉多州古德里奇的南普拉特河的小型辫状沙坝(约15 m长,5 m宽,1 m高),剖面显示由一个粗糙的平行层理的砾石脊形成坝核,大型的板状层理和复合层理前积层从轴部向外倾斜,反映了沙坝通过滑落面前积和侧向加积不对称地向外增长,坝顶发育大量的沙纹层理,证明了侧向加积是形成辫状河道中沙坝的重要条件,这些观点与我们今天仍然把侧向加积作为曲流河的判别标志完全不同。

Bristow<sup>[111]</sup>统计发现布拉马普特拉河上游和恒河的汇合地区大型沙坝上最主要的沉积作用是侧积(57%),向下游加积(29%)和向上游加积(14%)。Bristow<sup>[53]</sup>提出,古河道类型很可能取决于河道尺度各种沉积特征的相对丰度,而不是它们存在与否。

Bridge *et al.*<sup>[112]</sup>和Bridge<sup>[16]</sup>等认为,完整的河流相模式应该包括平面图、剖面图和沉积相柱状图。为了区分辫状河和曲流河的古河道沉积,需要在二维露头上结合垂向剖面一起详细刻画大型河道沙坝的特征。运用在露头 and 岩芯中所获得的交错层理的厚度,根据交错层厚度和水深的关系也可以估计古河道深

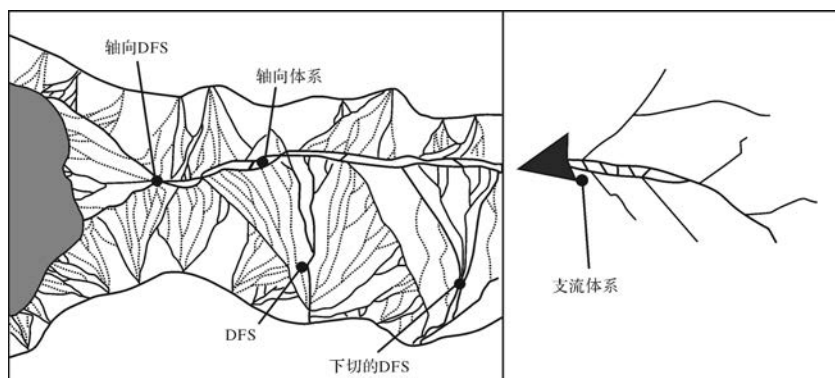


图7 分支河流体系(DFS)与支流体系的差异(据Weissmann *et al.*, 2010修改)

Fig.7 Key characteristics and differences between distributive fluvial systems (DFS) and tributary fluvial systems

(modified from Weissmann *et al.*, 2010)



度,但是这些公式具有相当大的标准误差。河流相模式已经从强调结构和沉积构造垂向组合的岩相图演变为能够反映河道沙坝残余和大型底形的二维和三维图件。

我国河流沉积学工作者在上世纪建立了曲流河、辫状河和网状河的相模式<sup>[113-115]</sup>,结合油气田开发需要,对不同河流的砂体形态和储层非均质模式进行了系统的研究<sup>[116]</sup>,笔者等<sup>[117]</sup>在以前的综述中对此进行了回顾。此后十多年来,沉积学工作者在河道沉积建筑结构模式研究方面做了大量的工作<sup>[118-123]</sup>,李胜利等<sup>[124]</sup>通过野外露头观察与实测,明确了准噶尔盆地彩南地区头屯河期的古河流类型与沉积序列,并建立了相应的沉积模式;谢庆宾等<sup>[125]</sup>根据我国长江、黑龙江、珠江、嫩江、赣江等河流的水网特征,将网状河划分为平原网状河流、山谷网状河流、入湖三角洲平原网状河流和入海三角洲平原网状河流四大类型,提出了网状河的沉积模式,认为细粒的溢岸沉积物在剖面上可占80%~90%,在干旱地区的网状河流体系中这一比例可能更高,嫩江齐齐哈尔段的细粒沉积物可占到85%~90%左右。

我国近年来开展的大规模现代河流沉积和露头调查的数量与国外相比显得较少,规模较小,沉积模式研究多数成果仍停留在证实已有的观点,类似于上世纪提出的“非均质模式”、“泛连通体”、“半连通体”等创新性概念不多。加强从垂向剖面、横剖面、平面形态和三维立体等方面对各端点河流及其衍生亚类进行沉积模式重建,研究沉积模式随时空的变化规律是河流沉积学今后努力的重要方向。

## 7 河流沉积学研究新技术

### (1) 地震沉积学

三维地震数据使得地球科学家能够沿着选定的时间,平面和地层切片对地层记录进行成像,这些切片可以提供古老的沉积体系和环境的平面几何形状的详细图像。曾洪流<sup>[126]</sup>和曾洪流等<sup>[127]</sup>将这一方法称为地震沉积学,地震沉积学提出之后在国内外得到快速推广,广泛应用于对各种沉积环境下形成的沉积砂体和沉积体系的刻画<sup>[128-135]</sup>,地震沉积学已经成为研究地下河流砂体几何形态和河流沉积体系建筑结构的有效手段。

### (2) 探地雷达技术(GPR)

现代河流沉积研究的主要困难是无法对水下沉积物进行检测和记录,早期提出的相模式大部分依赖

于对坝顶沉积物的描述,不能反映河道砂体的全貌,将探地雷达(GPR)和连续取芯相结合弥补了这一缺陷<sup>[136-139]</sup>。GPR技术在国内工程领域得到广泛的应用,但在现代沉积学研究中的应用还刚刚开始,胡光义等(2016,个人交流)利用探地雷达反射剖面,在海拉尔地区曲流河点坝砂体中识别出10级沉积界面,认为5级界面代表河谷边界,6级界面代表活动河道带形成的河道复合体界面,7级界面是现存河道形成的多期河道点坝复合体界面;单个点坝砂体和单层侧积体的边界分别为8级和9级界面(图8)。

### (3) 数字露头

把传统的地质描述与激光雷达(LIDAR)及无人机(UAV)等先进测绘手段相结合,定量精确描绘露头区的沉积特征,是近10年来露头沉积学描述技术的重大进步。朱如凯等<sup>[140]</sup>将数字露头模型技术与探地雷达技术相结合预测鄂尔多斯盆地延长组谭家河露头区域地下砂体形态特征,建立砂体三维空间分布模型;曾齐红等<sup>[141]</sup>根据地面激光雷达、高精度差分GPS和高精度数码影像资料,建立了数字露头表层模型;在该模型的基础上开展了露头砂体展布与发育情况的分析,对识别出的三角洲平原分流河道砂体和三角洲前缘水下分流河道砂体进行了定量刻画;刘学锋等<sup>[142]</sup>将激光雷达技术应用到露头地层成图研究中,形成了鄂尔多斯盆地上三叠统延长组杨家沟剖面数字露头,在数字露头上进行层序边界识别和层序界面追踪,划分出1个四级层序界面,识别出了3个不对称式短期旋回。

### (4) Google 图像解译技术

高清晰的卫星图像使得人们能够观察到沉积体系的整体面貌,并对局部的特征进行描述。石书缘等<sup>[143]</sup>利用Google Earth软件测量了一系列曲流河河道宽度、点坝长度及弧长等数据,为建立储层地质模型提供了知识库信息;乔辉等<sup>[144]</sup>采用Google Earth软件观测曲流河特征,将曲流河划分为单一河道低弯曲度小边滩发育型、单一河道高弯曲度大边滩发育型、简单河道低弯曲度小边滩发育型、简单河道高弯曲度大边滩发育型、多河道低弯曲度小边滩发育型、多河道高弯曲度大边滩发育型6种类型,发现曲流河河道宽度与点坝长度、河道宽度与单一曲流带宽度、点坝长度与点坝宽度间均具有较好的正相关关系。相信随着我国航天遥测技术的发展,我们能够获得更多有关沉积体系及其演变方面的信息,尤其是关于河道变迁和河型转换的更详细的数据。

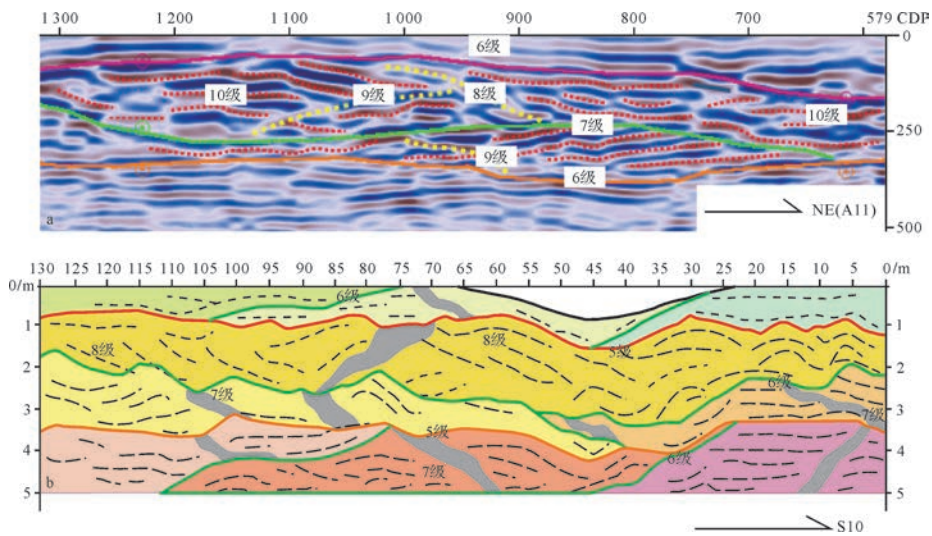


图8 GPR技术获取的海拉尔地区曲流河点坝砂体内部建筑结构要素及沉积界面分布(据胡光义等,2016,个人交流)。a.GPR反射界面;b.点坝砂体内部建筑结构要素及沉积界面分布  
Fig.8 GPR image(a) and interpreted a point bar architectural elements and the boundary surfaces (b) in a meandering river, Hailar, Inner-Mongolia (from Hu *et al.*, 2016, personal communication)

### (5) 地质统计学建模技术

为了建立河流砂体的储层地质模型,要求结合地质、测井、地震、开发以及工程信息对河道砂体的内部结构及其储层物性进行内插和外推。Haldorsen<sup>[145]</sup>较早将该项技术应用到泥岩夹层的模拟;Deutsch<sup>[146-147]</sup>提出的Fluvisim是第一个比较真实刻画河流相储层分布的基于目标的建模算法。国内学者在河流沉积定量化、模型化和可视化方面做了积极的探索;尹艳树<sup>[148]</sup>采用层次建模法,建立曲流河道、点坝及侧积层分布模型和辫状河道、心滩、落淤层的分布模型;李少华<sup>[149]</sup>对Alluvsim方法进行了改进,更合理地刻画了点坝砂体的内部结构。一些学者在模拟中应用了不同河流的河相关公式,舒晓等<sup>[150]</sup>根据弯道水流运动方程和河岸迁移公式,建立了曲流河道演化模型;赵永军等<sup>[151]</sup>基于河道迁移演化模拟、侧积层定量三维分布模式及沉积过程模拟提出一种复杂曲流带储层三维构型建模新方法,并根据井数据构建渤海湾盆地A油田明化镇组下段曲流河相储层三维构型模型。

### (6) 沉积模拟实验技术

水槽实验技术最早主要用于观察泥沙颗粒的运动和建设水工模型<sup>[152-154]</sup>,上世纪80年代以后,用于模拟湖泊和海洋潮汐、波浪等沉积过程的大型水槽在各国不断出现,上世纪90年代初,中国石油天然气集团在江汉石油学院建设的湖盆沉积模拟实

验室,以其具有活动底板的优势,可以模拟不同构造环境下湖盆沉积的河流<sup>[155]</sup>、三角洲<sup>[156]</sup>、重力流<sup>[157-158]</sup>等砂体的成因,20余年来为含油气盆地的储层沉积学研究提供了一个有力的手段。与水利工程领域开展的模拟实验相比,沉积学模拟面临时间跨度大,空间区域广等困难,在实验的设计、操作过程和结果的应用方面存在定量化不足的缺陷,需要创新研究思路,优化研究方法,加强模拟的定量化,增强研究成果对生产实践的指导作用。

### (7) 地球化学技术

地球化学分析是现代河流水质分析的基本手段,已发表的关于河流地球化学指标方面的论文非常丰富。常维娜<sup>[159]</sup>认为河流泥沙是磷等众多污染物的重要载体,泥沙结合态的磷输出占全年总磷负荷的75%~95%。这种方法对研究古代沉积物中微量元素的迁移和富集具有一定的借鉴;王成玲<sup>[160]</sup>通过沉积物粒度、地球化学指标分析,探讨了沂河中游临沂市河东区机场附近7 900~2 600 a. B.P.的气候变化;张心昱<sup>[161]</sup>综述了应用<sup>137</sup>Cs技术调查河漫滩沉积物的沉积率、确定沉积物来源。现代河流的地球化学分析方法对追溯古河流的流域地质、地理、气候和生态环境具有重要的意义,但目前对古代河流沉积的地球化学研究较少。

## 8 结论与建议

(1) 随着对现代河流认识的不断深入,将河流划



分为顺直河、曲流河、辫状河和网状河四个端元类型的分类方案难以满足对河流多样性的解释。一段河谷范围内可以出现多种类型的河道,自然界河流的形态受地质构造背景、基准面升降、气候区带、河谷两岸的地形地貌、河流流量、流速、河床坡降、河床物质成分、河段所处的位置、植被状况、相对于湖泊和海洋的远近等复杂因素的影响,河道类型形成了一个连续变化的谱系。河流沉积学界应当注重对现代河流地貌形态和沉积过程的观察,对影响河道形态和河流沉积物、河流沉积砂体结构的各种因素进行详细的分析。

(2) 现代河流的河道形态随着时间、空间、地质背景、气候环境、沉积水动力条件和床沙物质的变化不断演变,河型转换是河流沉积过程中频繁出现的正常现象。我们对古代河流的变异性还缺乏了解,我们能够看到不同河流沉积物出现在一定的沉积序列之中,但很少研究从一种河流序列演化为另一种序列真正的原因是什么,我们还不善于从地层记录中寻找影响河型演化的各种因素。沉积学家应当和泥沙专家以及地理地貌学家合作,把河床演变学的定量方法与沉积学的观点、理论和资料相结合,以便对古代河流的类型做出更加准确的判断。

(3) 相模式已经从垂直岩相剖面发展到包括河道沙坝建筑结构的横剖面、古河道和河道砂体平面分布的平面图在内的三维模式。使用垂向剖面分析法难以对河流的类型做出准确的判断,利用典型沉积构造和代表性沉积构造序列也会造成对河流类型的误判,河道砂体的形态不能作为判断河道类型的依据。准确进行河型识别需要尽可能运用三维地质信息对河道内发育的大型底形的建筑结构进行定量表征。由于河流的多样性,Miall 最初提出的岩石相、界面系列和建筑结构要素的类型已不能满足对所有河流砂体进行解剖的需要,出露良好的露头、三维地震资料和探地雷达技术可以协助我们获得更多关于河流砂体内部建筑结构的信息。

(4) 河漫滩地区沉积速率较小,沉积环境相对稳定,其中蕴藏着大量古河流、古环境、古气候和古生物方面的信息,研究现代河漫滩沉积对研究人类世以来的环境变迁和气候事件具有重要的意义。研究现代河漫滩沉积物中的洪水记录对揭示地质历史上的河流类型和河流沉积事件提供了可供对比的尺度和方法。目前我们对古河流河漫滩和泛滥平原沉积的过程、特征及其控制因素还知之甚少,沉积地质学家应当重视对河漫滩和泛滥平原沉积层序的研究。

(5) 构造、气候和基准面不但控制了河流沉积体系形成和分布的外部条件,也控制了河流的流速、流量和所携带的泥沙颗粒特征等内部条件。沉积学家认识到不同气候条件下河流的沉积构造类型、沉积砂体建筑结构要素的类型以及沉积层序都具有明显的差异,对古河流沉积时期深时气候的研究方兴未艾。目前在区分季风影响的季节性河流和常年性河流方面做了一些尝试,但我们还不能判断古代河流沉积物形成于热带、亚热带还是温带地区,而且在同一气候区可能活动着不同类型的河流。

(6) 分支河流体系的概念为我们开启了认识大型河流沉积体系的新思路。扇状体系不再是洪(冲)积扇的专有形态,在同一个分支河流体系上可能既发育辫状河,也可能发育曲流河和其他类型的河流,一种河流在侧向上或纵向上可能转变为另一种河流。尽管在地球的历史上,陆相盆地的大部分地区不一定都被分支河流体系所占领,但目前的地球表面确实存在大量长达数百公里的分支河流体系。DFS 使得我们有可能将一个地区零散分布的冲积体系综合成一个密切相关的巨型沉积体系,从这一点出发,我们有必要对以前所发现的冲积扇—河流—三角洲沉积体系进行重新的审视。

(7) 近 10 年来,随着信息技术、网络技术、计算机技术的进步,随着沉积学与地球科学其他领域的交叉,大量新的研究技术、方法和思路推动了河流沉积学快速发展。中国河流沉积学研究应当继续跟踪赶超国际河流沉积学研究的最新动向,扩大同国内泥沙研究、地理地貌学研究等学科的合作,不断夯实河流沉积学发展的理论基础,大量吸收计算机信息技术和空间地球物理地球化学等方面的新成果新方法新手段,加强实验分析和沉积模拟实验室建设,培养年轻的河流沉积学研究队伍,开展跨学科跨专业跨领域协同研究,使得我国河流沉积学研究队伍更大、成果更多、水平更高、领域更广、技术更尖、应用更实,为国家经济社会发展提供更加有力和有效的支撑,为推动国际河流沉积学发展做出中国人自己的贡献。

### 参考文献 (References)

- [1] Allen J R L. Henry Clifton Sorby and the sedimentary structures of sands and sandstones in relation to flow conditions[J]. *Sedimentology*, 1963, 42: 223-228.
- [2] Doeglas D J. The structure of sedimentary deposits of braided rivers [J]. *Sedimentology*, 1962, 1(3): 167-190.
- [3] Rust B R. A classification of alluvial channel system[M]//Miall A

- D. Fluvial sedimentology. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1977, 5: 187-198.
- [4] Smith D G. Anastomosed fluvial deposits: modern examples from western Canada[M]//Collinson J D, Lewin J. Modern and ancient fluvial systems. Oxford: Special Publication of the International Association of Sedimentologists, 1983, 6: 155-168.
- [5] 裘亦楠. 河流沉积学中的河型分类[J]. 石油勘探与开发, 1985, 12(2): 72-74. [Qiu Yinan. Classification of river pattern in fluvial sedimentology[J]. Petroleum Exploration and Development, 1985, 12(2): 72-74.]
- [6] Miall A D. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits [J]. Earth-Science Reviews, 1985, 22(4): 261-308.
- [7] Rosgen D L. A classification of natural rivers[J]. CATENA, 1994, 22(3): 169-199.
- [8] Knighton A D, Nanson G C. Anastomosis and the continuum of channel pattern[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1993, 18(7): 613-625.
- [9] Bridge M J S. Rivers and floodplains[M]. Oxford, U.K.: Blackwell Publishing, 2003: 491.
- [10] 何萍, 史培军, 刘树坤, 等. 河流分类体系研究综述[J]. 水科学进展, 2008, 19(3): 434-442. [He Ping, Shi Peijun, Liu Shukun, et al. Classification of rivers systems[J]. Advances in Water Science, 2008, 19(3): 434-442.]
- [11] Schumm S A, Dumont J F, Holbrook J M. Active tectonics and alluvial rivers[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 276.
- [12] Schumm S A. River variability and complexity[M]. Cambridge, U. K.: Cambridge University Press, 2005: 220.
- [13] Fotherby L M. Valley confinement as a factor of braided river pattern for the Platte River[J]. Geomorphology, 2009, 103(4): 562-576.
- [14] Lunt L A, Bridge J S, Tye R S. A quantitative, three-dimensional depositional model of gravelly braided rivers[J]. Sedimentology, 2004, 51(3): 377-414.
- [15] Brice J C. Stream channel stability assessment[R]. Federal Highway Administration Report No. FHWA/RD-82/021. Washington, DC: US Department of Transportation, 1982: 42.
- [16] Bridge J S. Fluvial facies models: recent developments [M]//Posamentier H W, Walker R G. Facies models revisited. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geologists), Special Publication, 2006, 84: 85-170.
- [17] Schumm S A. The fluvial system[M]. New York: Wiley, 1977: 338.
- [18] Van Den Berg J H. Prediction of alluvial channel pattern of perennial rivers[J]. Geomorphology, 1995, 12(4): 259-279.
- [19] Tooth S, Nanson G C. Forms and processes of two highly contrasting rivers in arid central Australia, and the implications for channel-pattern discrimination and prediction[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(7/8): 802-816.
- [20] Tooth S, McCarthy T S. Controls on the transition from meandering to straight channels in the wetlands of the Okavango delta, Botswana[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2004, 29(13): 1627-1649.
- [21] 钱宁. 关于河流分类及成因问题的讨论[J]. 地理学报, 1985, 40(1): 1-10. [Qian Ning. On the classification and causes of formation of different channel patterns[J]. Acta Geographica Sinica, 1985, 40(1): 1-10.]
- [22] 陈宝冲. 河床类型的划分及其特征[J]. 南京大学学报(自然科学版), 1987, 23(1): 100-109. [Chen Baochong. On river channel patterns and their features[J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences Edition), 1987, 23(1): 100-109.]
- [23] 王随继, 任明达. 根据河道形态和沉积物特征的河流新分类[J]. 沉积学报, 1999, 17(2): 240-246. [Wang Suiji, Ren Mingda. A new classification of fluvial rivers according to channel planform and sediment characteristics[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, 17(2): 240-246.]
- [24] 解哲辉, 黄河清, 周园园, 等. 游荡性河流演变规律研究进展及其河型归属探讨[J]. 地理科学进展, 2016, 35(7): 898-909. [Xie Zhehui, Huang Heqing, Zhou Yuanyuan, et al. Progress on the study of fluvial process of wandering rivers and discussion about its channel pattern classification [J]. Progress in Geography, 2016, 35(7): 898-909.]
- [25] 张俊勇, 陈立, 张春燕, 等. 支流入汇对汉江中下游的影响[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(1): 53-57. [Zhang Junyong, Chen Li, Zhang Chunyan, et al. Influence of inflow of anabranches on middle-lower reaches of the Hanjiang River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38(1): 53-57.]
- [26] 吴昌洪, 林木松, 柳小珊, 等. 河型分类研究现状与展望[J]. 人民长江, 2014, 45(1): 6-10, 65. [Wu Changhong, Lin Musong, Liu Xiaoshan, et al. Research status and prospect of river pattern classification[J]. Yangtze River, 2014, 45(1): 6-10, 65.]
- [27] 陶杰, 史传文. 冲积河流河型自然分类方法研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(8): 3-4, 7. [Tao Jie, Shi Chuanwen. Study on natural classification of alluvial river types[J]. Yellow River, 2010, 32(8): 3-4, 7.]
- [28] 史传文, 吴保生, 马吉明. 黄河下游河型分类与判别模式研究[J]. 泥沙研究, 2007(4): 53-58. [Shi Chuanwen, Wu Baosheng, Ma Jiming. Classification and discrimination of channel patterns in the lower Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2007(4): 53-58.]
- [29] 何建新, 黄浩, 王新忠. 塔里木河干流河型分类及判别模式研究[J]. 人民黄河, 2009, 31(8): 18-19, 22. [He Jianxin, Huang Hao, Wang Xinzong. Study on Pattern classification and discriminant mode of the main Tarim River[J]. Yellow River, 2009, 31(8): 18-19, 22.]
- [30] 余文畴. 长江中游下荆江蜿蜒型河道成因初步研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(6): 9-13. [Yu Wenchou. Preliminary study on forming condition of lower Jingjiang meandering channels of middle Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(6): 9-13.]
- [31] Leeder M R. Tectonic controls upon drainage basin development,



- river channel migration and alluvial architecture: implications for hydrocarbon reservoir development and characterization [M]// North C P, Prosser D J. Characterization of fluvial and aeolian reservoirs. London: Geological Society, London, Special Publication, 1993, 73: 7-22.
- [32] Lunt L A, Bridge J S. Evolution and deposits of a gravelly braid bar, Sagavanirktok River, Alaska [J]. *Sedimentology*, 2004, 51 (3): 415-432.
- [33] 许炳心, 师长兴. 河漫滩地生态系统影响下的河型转化: 以红山水库上游河道为例 [J]. *科学通报*, 1993, 38 (22): 2077-2081. [ Xu Jiongxin, Shi Changxing. River floodplain ecosystem under the influence of the transformation: A case study from the upstream river of Hongshan reservoir [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (22): 2077-2081.]
- [34] 许炳心, 师长兴. 河漫滩地生态系统影响下的河型转化: 以红山水库上游河道为例 [J]. *地理学报*, 1995, 50 (4): 335-343. [ Xu Jiongxin, Shi Changxing. River channel pattern change as influenced by the floodplain geocosystem: An example from the Hongshan reservoir [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1995, 50 (4): 335-343.]
- [35] 张红武, 赵连军, 曹丰生. 游荡河型成因及其河型转化问题的研究 [J]. *人民黄河*, 1996, 18 (10): 11-15. [ Zhang Hongwu, Zhao Lianjun, Cao Fengsheng. Study on the causes of wandering river and pattern transformation problem [J]. *Yellow river*, 1996, 18 (10): 11-15.]
- [36] 舒安平. 雍水分汉河道河型转化特征及其机理 [J]. *水动力学研究与进展*, 1994, 9 (1): 1-7. [ Shu Anping. The characteristics and mechanism of the transformation for the braided channel pattern in the backwater state water elevation [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1994, 9 (1): 1-7.]
- [37] 金德生. 河流地貌系统的过程响应模型实验 [J]. *地理研究*, 1990, 9 (2): 20-28. [ Jin Desheng. A process-response modelling in the river morphological system [J]. *Geographical Research*, 1990, 9 (2): 20-28.]
- [38] 周刚, 王虹, 邵学军, 等. 河型转化机理及其数值模拟: I. 模型建立 [J]. *水科学进展*, 2010, 21 (2): 145-152. [ Zhou gang, Wang Hong, Shao Xuejun, et al. Mechanism of channel pattern changes and its numerical simulation: I. numerical model [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21 (2): 145-152.]
- [39] 周刚, 王虹, 邵学军, 等. 河型转化机理及其数值模拟: II. 模型应用 [J]. *水科学进展*, 2010, 21 (2): 153-160. [ Zhou Gang, Wang Hong, Shao Xuejun, et al. Mechanism of channel pattern changes and its numerical simulation: II. application [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21 (2): 153-160.]
- [40] 倪晋仁, 王随继, 王光谦. 现代冲积河流的河型空间转化模式探讨 [J]. *沉积学报*, 2000, 18 (1): 1-6, 35. [ Ni Jinren, Wang Suiji, Wang Guangqian. Spatial variations of channel patterns [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (1): 1-6, 35.]
- [41] 赖志云. 荆江三八滩现代沉积特征: 兼论滩体的成因、演变 [J]. *江汉石油学院学报*, 1983 (2): 1-32. [ Lai Zhiyun. The "Thirty eight" beach modern sedimentary characteristics of Jingzhou section of the Yangtze River—formation and evolution of the beach body [J]. *Journal of Jiangnan Petroleum Institute*, 1983 (2): 1-32.]
- [42] 王随继. 大同盆地中侏罗世河流沉积体系及古河型演化 [J]. *沉积学报*, 2001, 19 (4): 501-505. [ Wang Suiji. Fluvial depositional systems and river pattern evolution of middle Jurassic series, Datong Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19 (4): 501-505.]
- [43] 刘朋远, 柳成志, 辛仁臣. 松辽盆地东南缘籍家岭泉头组沉积微相特征及演化: 由冲积扇演化为曲流河的典型露头剖面 [J]. *现代地质*, 2015, 29 (5): 1338-1347. [ Liu Pengyuan, Liu Chengzhi, Xin Renchen. Sedimentary microfacies characteristics and evolution of Quantou Formation in Jijialing profile in the southeast margin of the Songliao Basin: A typical profile reflecting the evolution of alluvial fan to meandering river [J]. *Geoscience*, 2015, 29 (5): 1338-1347.]
- [44] 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.]
- [45] 廖保方, 张为民, 李列, 等. 辫状河现代沉积研究与相模式: 中国永定河剖析 [J]. *沉积学报*, 1998, 16 (1): 34-39, 50. [ Liao Baofang, Zhang Weimin, Li Lie, et al. Study on modern deposit of a braided stream and facies model-Taking the Yongding River as an example [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16 (1): 34-39, 50.]
- [46] 王俊玲, 任纪舜. 嫩江现代河流沉积体岩相及内部构形要素分析 [J]. *地质科学*, 2001, 36 (4): 385-394. [ Wang Junling, Ren Jishun. Analysis on lithofacies and interior architectural elements of modern fluvial deposits in Nenjiang River, NE China [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2001, 36 (4): 385-394.]
- [47] 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.]
- [48] 李胜利, 于兴河, 姜涛, 等. 河流辫一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.]
- [49] Allen J R L. Studies in fluvial sedimentation: bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the Brownstones (L. devonian), Welsh borders [J]. *Sedimentary Geology*, 1983, 33 (4): 237-293.
- [50] Miall A D. The architecture of fluvial-deltaic sequences in the Upper Mesaverde Group (Upper Cretaceous), books cliffs, utah [M]// Best J L, Bristow C S. Braided rivers. London: Geological Society, London, Special Publication, 1993, 75: 305-332.
- [51] Miall A D. The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology [M]. Berlin, New York:

- Springer-Verlag, 1996: 582.
- [52] Bridge J S. Description and interpretation of fluvial deposits: a critical perspective[J]. *Sedimentology*, 1993, 40(4): 801-810.
- [53] Bristow C S. Reconstructing fluvial channel morphology from sedimentary sequences[M]//Carling P A, Dawson M R. *Advances in fluvial dynamics and stratigraphy*. New York: John Wiley & Sons, 1996: 351-371.
- [54] Nami M. An exhumed Jurassic meander belt from Yorkshire, England[J]. *Geological Magazine*, 1976, 113(1): 47-52.
- [55] Padgett G, Ehrlich R. Paleohydrologic analysis of a late Carboniferous fluvial system, southern Morocco[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1976, 87(8): 1101-1104.
- [56] Smith R M H. Morphology and depositional history of exhumed Permian point bars in the southwestern Karoo, South Africa[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(1): 19-29.
- [57] Willis B. Evolution of Miocene fluvial systems in the Himalayan foredeep through a two kilometer-thick succession in northern Pakistan[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 88(1/2): 77-121.
- [58] Bridge J S, Diemer J A. Quantitative interpretation of an evolving ancient river system[J]. *Sedimentology*, 1983, 30(5): 599-623.
- [59] Bridge J S, Gordon E A. Quantitative interpretation of ancient river systems in the Oneonta Formation, Catskill Magnafacies[M]//Woodrow D L, Sevon W D. *The catskill delta*. Geological Society of America, Special Paper, 1985, 201: 163-181.
- [60] Gordon E A, Bridge J S. Evolution of catskill (Upper Devonian) river systems; intra- and extrabasinal controls[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(2): 234-249.
- [61] Willis B J. Ancient river systems in the Himalayan foredeep, Chinji Village area, northern Pakistan[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 88(1/2): 1-12, 15-18, 21-28, 30-32, 35-37, 43-76.
- [62] Willis B J, Behrensmeier A K. Architecture of Miocene overbank deposits in northern Pakistan[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1994, B64: 60-67.
- [63] 杨丽莎,陈彬滔,李顺利,等. 基于成因类型的砂质辫状河泥岩分布模式:以山西大同侏罗系砂质辫状河露头为例[J]. *天然气地球科学*, 2013, 24(1): 93-98. [Yang Lisha, Chen Bintaotao, Li Shunli, et al. Pattern of genesis-based mudstone distribution for sandy braided river: A case study of sandy braided-river outcrop, Datong, Shanxi province, China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2013, 24(1): 93-98.]
- [64] 陈彬滔,于兴河,王天奇,等. 砂质辫状河岩相与构型特征:以山西大同盆地中侏罗统云冈组露头为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 111-117. [Chen Bintaotao, Yu Xinghe, Wang Tianqi, et al. Lithofacies and architectural characteristics of sandy braided river deposits: A case from outcrops of the middle Jurassic Yungang Formation in the Datong Basin, Shanxi province[J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 111-117.]
- [65] 印森林,吴胜和,许长福,等. 砂砾质辫状河沉积露头渗流地质差异分析:以准噶尔盆地西北缘三叠系克上组露头为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2014, 43(2): 286-293. [Yin Senlin, Wu Shenghe, Xu Changfu, et al. Percolation differences of sedimentary outcrop in sand-gravel braided river: A case study of Triassic upper Karamay Formation outcrop in the northwest edge of Junggar Basin[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2014, 43(2): 286-293.]
- [66] 金振奎,杨有星,尚建林,等. 辫状河砂体构型及定量参数研究:以阜康、柳林和延安地区辫状河露头为例[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(3): 311-317. [Jin Zhenkui, Yang Youxing, Shang Jianlin, et al. Sandbody architecture and quantitative parameters of single channel sandbodies of braided river: Cases from outcrops of braided river in Fukang, Liulin and Yanan areas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(3): 311-317.]
- [67] 付晶,吴胜和,王哲,等. 湖盆浅水三角洲分流河道储层构型模式:以鄂尔多斯盆地东缘延长组野外露头为例[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2015, 46(11): 4174-4182. [Fu Jing, Wu Shenghe, Wang Zhe, et al. Architecture model of shallow-water delta distributary channel in lake basin: A case study of the Yanchang Formation outcrops in the eastern margin of Ordos Basin[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2015, 46(11): 4174-4182.]
- [68] 朱卫红,吴胜和,尹志军,等. 辫状河三角洲露头构型:以塔里木盆地库车坳陷三叠系黄山街组为例[J]. *石油勘探与开发*, 2016, 43(3): 482-489. [Zhu Weihong, Wu Shenghe, Yin Zhijun, et al. Braided river delta outcrop architecture: A case study of Triassic Huangshanjie Formation in Kuche depression, Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2016, 43(3): 482-489.]
- [69] 白振强,王清华,杜庆龙,等. 曲流河砂体三维构型地质建模及数值模拟研究[J]. *石油学报*, 2009, 30(6): 898-902, 907. [Bai Zhenqiang, Wang Qinghua, Du Qinglong, et al. Study on 3D architecture geology modeling and digital simulation in meandering reservoir[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2009, 30(6): 898-902, 907.]
- [70] 张存才,付志国,黄述旺. 曲流河点坝砂体内部建筑结构三维地质建模[J]. *海洋石油*, 2007, 27(4): 19-24. [Zhang Cuncai, Fu Zhiguo, Huang Shuwang. Inner geometry configuration three dimensional geological modeling of meandering river point bar sand body[J]. *Offshore Oil*, 2007, 27(4): 19-24.]
- [71] 陈雨茂,邓文秀,滕彬彬. 曲流河点坝内部构型精细解剖:以垦西油田垦71断块馆陶组为例[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(4): 25-27. [Chen Yumao, Deng Wenxiu, Teng Binbin. Internal detailed description on bar sand of meandering river based on multiscale data-Case study of Guantao Formation, Ken71 fault block, Kenxi oilfield[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(4): 25-27.]
- [72] 李国永,李华君,轩玲玲,等. 南堡凹陷曲流河点坝储层内部构型解剖与剩余油挖潜[J]. *石油天然气学报(江汉石油学院学报)*, 2013, 35(6): 17-21. [Li Guogong, Li Huajun, Xuan Lingling, et al. Reservoir architecture anatomy in meandering river point bar and tapping the potential of remaining oil in Nanpu sag[J]. *Journal of Oil and Gas Technology (Journal of Jianghan Petroleum Institute)*, 2013, 35(6): 17-21.]



- [73] 程会明. 孤岛油田曲流点坝构型[J]. 油气地质与采收率, 2008, 15(5): 20-23. [Cheng Huiming. Configuration analysis of meander point bar in Gudao oilfield[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2008, 15(5): 20-23.]
- [74] 单敬福, 张吉, 赵忠军, 等. 地下曲流河点坝砂体沉积演化过程分析: 以吉林油田杨大城子油层第23小层为例[J]. 石油学报, 2015, 36(7): 809-819. [Shan Jingfu, Zhang Ji, Zhao Zhongjun, et al. Analysis of sedimentary and evolution process for underground meandering river point bar: A case study from No.23 thin layer of Yangdachengzi oil reservoir in Jilin oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(7): 809-819.]
- [75] 徐振永, 吴胜和, 杨渔, 等. 地下曲流河沉积点坝内部储层构型研究: 以大港油田一区一断块 Dj5 井区为例[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(增刊1): 86-89. [Xu Zhenyong, Wu Shenghe, Yang Yu, et al. Study on reservoir's structural model inside sedimentary point bar of underground meandering river: Taking well Dj-5 in block-1 of zone-1 in Dagang oil-field as a case[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2007, 42(Suppl.1): 86-89.]
- [76] 牛博, 高兴军, 赵应成, 等. 古辫状河心滩坝内部构型表征与建模: 以大庆油田萨中密井网区为例[J]. 石油学报, 2015, 36(1): 89-100. [Niu Bo, Gao Xingjun, Zhao Yingcheng, et al. Architecture characterization and modeling of channel bar in paleo-braided river: A case study of dense well pattern area of Sazhong in Daqing oilfield[J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(1): 89-100.]
- [77] 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 of reservoir outcrop[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(4): 105-108.]
- [78] 贾爱林, 陈亮, 穆龙新, 等. 扇三角洲露头区沉积模拟研究[J]. 石油学报, 2000, 21(6): 107-110. [Jia Ailin, Chen Liang, Mu Longxin, et al. A study on sedimentary simulation of fan-delta outcrop[J]. Acta Petrolei Sinica, 2000, 21(6): 107-110.]
- [79] 张凌华, 张振克. 河漫滩沉积与环境研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(5): 153-163. [Zhang Linghua, Zhang Zhenke. Research progress of river overbank deposits and implications for environment[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(5): 153-163.]
- [80] 王长燕, 赵景波, 郁耀闯. 黄河兰州段高河漫滩洪水沉积及其气候意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(4): 125-132. [Wang Changyan, Zhao Jingbo, Yu Yaochuang. Flood sediment in valley flat and the climatic implications of Lanzhou section of the Yellow River[J]. Marine Geology & Quaternary, 2008, 28(4): 125-132.]
- [81] 赵景波, 刘晓青, 徐娜. 渭河眉县段高河漫滩沉积与洪水变化研究[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 119-125. [Zhao Jingbo, Liu Xiaoqing, Xu Na. A study on flood series recorded by sediments in high alluvial flat a long the Meixian reach of Weihe River[J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 119-125.]
- [82] 牛俊杰, 赵景波, 马莉, 等. 西安北郊渭河河漫滩沉积与洪水事件[J]. 地理研究, 2010, 29(8): 1484-1492. [Niu Junjie, Zhao Jingbo, Ma Li, et al. The research on the sediment of floodplain and flood events of Weihe River at Xiangjiexiang in the northern suburbs of Xi'an[J]. Geographical Research, 2010, 29(8): 1484-1492.]
- [83] 周岳, 赵景波, 穆珍珍. 西安市东郊渭河河漫滩沉积与洪水变化[J]. 水土保持通报, 2015, 35(1): 73-78, 84. [Zhou Yue, Zhao Jingbo, Mu Zhenzhen. Sediment of floodplain and flood change of Weihe River in eastern suburb of Xi'an city[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2015, 35(1): 73-78, 84.]
- [84] 郑文波, 邓宏文. 河流相溢岸沉积特征及其层序地层意义: 以大庆长垣扶余油层为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊2): 79-87. [Zheng Wenbo, Deng Hongwen. Sedimentary features and stratigraphy significance of overbank deposition in fluvial system: Taking the Fuyu Unit in Daqing oilfield as an example[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2012, 42(Suppl.2): 79-87.]
- [85] 许炯心. 试论河漫滩发育模式及其与气候变迁的关系[J]. 云南地理环境研究, 1991, 3(1): 66-73. [Xu Jiongxin. A preliminary study on carse developing model and its relationship with climate change[J]. Yunnan Geographic Environment Research, 1991, 3(1): 66-73.]
- [86] 梅冥相, 刘少峰. 陆生植被对河流沉积作用的影响: 生物沉积作用研究的一个重要主题[J]. 古地理学报, 2013, 15(1): 1-10. [Mei Mingxiang, Liu Shaofeng. Sedimentological impact of terrestrial vegetation on fluvial sedimentation: An important theme on bi-sedimentation studies[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(1): 1-10.]
- [87] 梅冥相, 刘少峰. 基于陆生植被对河流沉积作用的影响论上三叠统须家河组的冲积构架: 以重庆永川普安剖面为例[J]. 古地理学报, 2013, 15(2): 143-154. [Mei Mingxiang, Liu Shaofeng. Discussion of alluvial architecture for the upper Triassic Xujiahe Formation in terms of sedimentological impact of terrestrial vegetation on fluvial sedimentation: A case study at Pu'an section in Yongchuan of Chongqing[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(2): 143-154.]
- [88] Fielding C R, Allen J P, Alexander J, et al. Facies model for fluvial systems in the seasonal tropics and subtropics[J]. Geology, 2009, 37(7): 623-626.
- [89] Plink-Björklund P. Morphodynamics of rivers strongly affected by monsoon precipitation: review of depositional style and forcing factors[J]. Sedimentary Geology, 2015, 323: 110-147.
- [90] 李卫红, 陈亚宁, 郝兴明, 等. 新疆天山北坡河川径流对气候变化的响应研究: 以头屯河为例[J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2006, 36(增刊2): 39-44. [Li Weihong, Chen Yaning, Hao Xingming, et al. Responses of streamflow to climate change in the northern slope of Tianshan Mountains in Xinjiang: A case study of the Toutun River basin[J]. Science China (Seri.D): Earth Sciences, 2006, 36(Suppl.2): 39-44.]
- [91] 王延贵, 胡春宏, 周文浩, 等. 塔里木河干流河道的河型及其成因[J]. 泥沙研究, 2002(6): 19-25. [Wang Yangui, Hu Chunhong, Zhou Wenhao, et al. Study on river patterns of the Tarim River[J]. Journal of Sediment Research, 2002(6): 19-25.]

- [92] 许有鹏,杨戊. 塔克拉玛干沙漠周围主要河流水文序列特性分析[J]. 干旱区资源与环境,1994,8(4):17-26. [Xu Youpeng, Yang Wu. Hydrologic series characteristics analysis of the major rivers around the Taklimakan Desert[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1994, 8(4): 17-26.]
- [93] 李华启,姜在兴,邱隆伟,等. 柯克亚凝析气田中新统西河甫组季节性河流沉积特征研究[J]. 新疆地质,2003,21(1):69-73. [Li Huaqi, Jiang Zaixing, Qiu Longwei, et al. Seasonal river sedimentation of Xihefu Formation in Kekeya gas condensate field[J]. Xinjiang Geology, 2003, 21(1): 69-73.]
- [94] 梁俊红,巩恩普,董旭明,等. 辽西义县盆地义县组底部沉积相与沉积环境分析[J]. 沉积学报,2007,25(4):545-553. [Liang Junhong, Gong Enpu, Dong Xuming, et al. Sedimentary facies and palaeoenvironment analyses on Yixian Formation bottom layers of Yixian Basin, in western Liaoning province[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(4): 545-553.]
- [95] 高志勇,冯佳睿,周川闽,等. 干旱气候环境下季节性河流沉积特征:以库车河剖面下白垩统为例[J]. 沉积学报,2014,32(6):1060-1071. [Gao Zhiyong, Feng Jiarui, Zhou Chuanmin, et al. Arid climate seasonal rivers deposition: A case of lower cretaceous in Kuche river outcrop[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(6): 1060-1071.]
- [96] 高志勇,周川闽,冯佳睿,等. 盆地内大面积砂体分布的一种成因机理——干旱气候下季节性河流沉积[J]. 沉积学报,2015,33(3):427-438. [Gao Zhiyong, Zhou Chuanmin, Feng Jiarui, et al. Distribution of a large area of sand body formation mechanism: ephemeral streams in arid climate[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2015, 33(3): 427-438.]
- [97] Hartley A J, Weissmann G S, Nichols G J, et al. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: distributive fluvial systems[J]. Geology, 2010, 38(12): e230.
- [98] Hartley A J, Weissmann G S, Nichols G J, et al. Large distributive fluvial systems: characteristics, distribution, and controls on development[J]. Journal of Sedimentary Research, 2010, 80(2): 167-183.
- [99] Fielding C R, Ashworth P J, Best J L, et al. Tributary, distributary and other fluvial patterns: what *really* represents the norm in the continental rock record? [J]. Sedimentary Geology, 2012, 261-262: 15-32.
- [100] Quartero E M, Leier A L, Bentley L R, et al. Basin-scale stratigraphic architecture and potential Paleocene distributive fluvial systems of the Cordilleran Foreland Basin, Alberta, Canada[J]. Sedimentary Geology, 2015, 316: 26-38.
- [101] Owen A, Hartley A J, Weissmann G S, et al. Uranium distribution as a proxy for basin-scale fluid flow in distributive fluvial systems[J]. Journal of the Geological Society, 2016, 173(4): 569-572.
- [102] Bridge J S. Paleochannel patterns inferred from alluvial deposits: a critical evaluation[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1985, 55(4): 579-589.
- [103] Miall A D. Description and interpretation of fluvial deposits: a critical perspective[J]. Sedimentology, 1995, 42(2): 379.
- [104] Miall A D. In defense of facies classifications and models[J]. Journal of Sedimentary Research, 1999, 69(1): 2-5.
- [105] Ethridge F G. Interpretation of ancient fluvial channel deposits: review and recommendations [M]//Davidson S K, Leleu S, North C P. From river to rock record. Tulsa, Oklahoma: SEPM, 2011, 97: 9-35.
- [106] Bluck B J. Sedimentation in the meandering River Endrick[J]. Scottish Journal of Geology, 1971, 7(2): 93-138.
- [107] Jackson II R G. Depositional model of point bars in the lower Wash River[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1976, 48(3): 579-594.
- [108] Jackson R G II. Preliminary evaluation of lithofacies models for meandering alluvial streams[M]//Miall A D. Fluvial sedimentology. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1978, 5: 543-576.
- [109] Collinson J D. Vertical sequence and sand body shape in alluvial sequences[M]//Miall A D. Fluvial sedimentology. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1978, 5: 577-586.
- [110] Harvey M D, Crews S, Pitlick J, et al. Holocene braided streams of eastern Colorado and sedimentological effects of Lawn Lake dam failure, Rocky Mountain National Park[C]//Flores R M, Harvey M. Field guidebook to modern and ancient fluvial systems in the United States. Fort Collins, Colorado: Third International Fluvial Sedimentology Conference, 1985: 87-105.
- [111] Bristow C S. Brahmaputra River: channel migration and deposition[M]//Ethridge F G, Flores R M, Harve M D. Recent developments in fluvial sedimentology. SEPM, 1987, 39: 63-74.
- [112] Bridge J S, Lunt I A. Depositional models of braided rivers [M]//Sambrook-Smith G H, Best J L, Bristow C S, et al. Braided rivers: process, deposits, ecology and management. Oxford: International Association of Sedimentologists, Special Publication, 2006, 36: 11-50.
- [113] 薛培华. 河流点坝相储层模式概论[M]. 北京:石油工业出版社,1991:16-83. [Xue Peihua. An introduction to reservoir models of point bar facies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991: 16-83.]
- [114] 何乃华,朱宣清. 河北平原曲流河现代沉积模式[J]. 地理学与国土研究,1990,6(2):41-45. [He Naihua, Zhu Xuanqing. Present depositional model and depositional model of meandering streams in Hebei Plain[J]. Geography and Territorial Research, 1990, 6(2): 41-45.]
- [115] 何乃华,朱宣清. 河北平原曲流河沉积特征及其模式[J]. 地理研究,1991,10(1):65-72. [He Naihua, Zhu Xuanqing. Present depositional feature and depositional model of meandering streams in Hebei Plain[J]. Geographical Research, 1991, 10(1): 65-72.]
- [116] 裘亦楠,王衡鉴,许仕策. 松辽陆相湖盆河流—三角洲各种沉积砂体的油水运动特点[J]. 石油学报,1980,1(增刊1):73-93. [Qiu Yanan, Wang Hengjian, Xu Shice. Characteristics of oil-water movement in fluvial-deltaic sand bodies deposited in



- continental lake basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1980, 1(Suppl. 1): 73-93.]
- [117] 张昌民,张尚锋,李少华,等. 中国河流沉积学研究20年[J]. *沉积学报*, 2004, 22(2): 183-192. [Zhang Changmin, Zhang Shangfeng, Li Shaohua, et al. Advances in Chinese fluvial sedimentology from 1983 to 2003[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2004, 22(2): 183-192.]
- [118] 汪彦,彭军,赵冉. 准噶尔盆地西北缘辫状河沉积模式探讨:以七区下侏罗统八道湾组辫状河沉积为例[J]. *沉积学报*, 2012, 30(2): 264-273. [Wang Yan, Peng Jun, Zhao Ran. Tentative discussions on depositional facies model of braided stream in the northwestern margin, Junggar basin: A case of braided stream deposition of Badaowan Formation, lower Jurassic in No.7 area[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(2): 264-273.]
- [119] 何顺利,兰朝利,门成全. 苏里格气田储层的新型辫状河沉积模式[J]. *石油学报*, 2005, 26(6): 25-29. [He Shunli, Lan Chaoli, Men Chengquan. New braided river model in Sulige gas field of Ordos Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2005, 26(6): 25-29.]
- [120] 赵春明,胡景双,霍春亮,等. 曲流河与辫状河沉积砂体连通模式及开发特征:以渤海地区秦皇岛32-6油田为例[J]. *油气地质与采收率*, 2009, 16(6): 88-91. [Zhao Chunming, Hu Jingshuang, Huo Chunliang, et al. Sandbody interconnectivity architecture and development characteristics of meandering river and braided river deposits: A case study of Qinhuangdao 32-6 oilfield, Bohai area[J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2009, 16(6): 88-91.]
- [121] 吴志雄,史基安,张永庶,等. 柴达木盆地北缘马北地区古近系辫状河微相特征及沉积模式[J]. *天然气地球科学*, 2012, 23(5): 849-855. [Wu Zhixiong, Shi Ji'an, Zhang Yongshu, et al. Sedimentary features and facies of paleogene braided river in Mabei area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2012, 23(5): 849-855.]
- [122] 陈玉琨,吴胜和,王延杰,等. 常年流水型砂质辫状河心滩坝内部落淤层展布样式探讨[J]. *沉积与特提斯地质*, 2015, 35(1): 96-101, 112. [Chen Yukun, Wu Shenghe, Wang Yanjie, et al. Distribution patterns of the fall-siltseams in the channel bar of the perennial sandy braided river: an approach[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2015, 35(1): 96-101, 112.]
- [123] 伊三泉. 饮马河大榆树林现代边滩流动单元的划分及沉积特征[J]. *大庆石油学院学报*, 2004, 28(2): 15-17, 127. [Yi Sanquan. Moving unit division and deposit features of modern side-beach in Dayushulin, Yinma River[J]. *Journal Daqing Petroleum Institute*, 2004, 28(2): 15-17, 127.]
- [124] 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, et al. Fluvial changes and sandbody distribution of Toutunhe Formation in Cainan area, Junggar Basin[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2015, 36(6): 660-667.]
- [125] 谢庆宾,朱筱敏,管守锐,等. 中国现代网状河流沉积特征和沉积模式[J]. *沉积学报*, 2003, 21(2): 219-227. [Xie Qingbin, Zhu Xiaomin, Guan Shourui, et al. Depositional characteristics and models of the modern anastomosing river in China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(2): 219-227.]
- [126] 曾洪流. 地震沉积学在中国:回顾和展望[J]. *沉积学报*, 2011, 29(3): 417-426. [Zeng Hongliu. Seismic sedimentology in China: a review[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(3): 417-426.]
- [127] 曾洪流,朱筱敏,朱如凯,等. 陆相拗陷型盆地地震沉积学研究规范[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(3): 275-284. [Zeng Hongliu, Zhu Xiaomin, Zhu Rukai, et al. Guidelines for seismic sedimentologic study in non-marine postrift basins[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(3): 275-284.]
- [128] 赵东娜,朱筱敏,董艳蕾,等. 地震沉积学在湖盆缓坡滩坝砂体预测中的应用:以准噶尔盆地车排子地区下白垩统为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 55-61. [Zhao Dongna, Zhu Xiaomin, Dong Yanlei, et al. Application of seismic sedimentology to prediction of beach and bar sandbodies in gentle slope of lacustrine basin: A case study of the lower Cretaceous in Chepaizi area, Junggar Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 55-61.]
- [129] 朱筱敏,李洋,董艳蕾,等. 地震沉积学研究方法和歧口凹陷沙河街组沙一段实例分析[J]. *中国地质*, 2013, 40(1): 152-162. [Zhu Xiaomin, Li Yang, Dong Yanlei, et al. The program of seismic sedimentology and its application to Shahejie Formation in Qikou depression of North China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 152-162.]
- [130] 朱筱敏,赵东娜,曾洪流,等. 松辽盆地齐家地区青山口组浅水三角洲沉积特征及其地震沉积学响应[J]. *沉积学报*, 2013, 31(5): 889-897. [Zhu Xiaomin, Zhao Dongna, Zeng Hongliu, et al. Sedimentary characteristics and seismic sedimentologic responses of shallow-water delta of Qingshankou Formation in Qijia area, Songliao Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(5): 889-897.]
- [131] 张义娜,朱筱敏,刘长利. 地震沉积学及其在中亚南部地区的应用[J]. *石油勘探与开发*, 2009, 36(1): 74-79. [Zhang Yina, Zhu Xiaomin, Liu Changli. Seismic sedimentology and its application in south of Central Asia[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2009, 36(1): 74-79.]
- [132] 刘化清,洪忠,张晶,等. 断陷湖盆重力流水道地震沉积学研究:以歧南地区沙一段为例[J]. *石油地球物理勘探*, 2014, 49(4): 784-794. [Liu Huaqing, Hong Zhong, Zhang Jing, et al. Seismic sedimentology research on fault-depressed lacustrine basin gravity flow channels of Oligocene Es<sub>1</sub> in Qi'nan area[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2014, 49(4): 784-794.]
- [133] 张晶,李双文,袁淑琴,等. 地震沉积学在识别重力流沉积体系中的应用[J]. *沉积学报*, 2015, 33(3): 578-586. [Zhang Jing, Li Shuangwen, Yuan Shuqin, et al. Mapping gravity flow depositional systems using seismic sedimentology[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(3): 578-586.]
- [134] 张涛,林承焰,张宪国,等. 开发尺度的曲流河储层内部结构

- 地震沉积学解释方法[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 74-80. [Zhang Tao, Lin Chengyan, Zhang Xianguo, et al. Method for seismic sedimentology interpretation of reservoir architectures on development scale in meandering river[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 19(2): 74-80.]
- [135] 曾洪流, 赵贤正, 朱筱敏, 等. 隐性前积浅水曲流河三角洲地震沉积学特征: 以渤海湾盆地冀中拗陷饶阳凹陷肃宁地区为例[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(5): 566-576. [Zeng Hongliu, Zhao Xianzheng, Zhu Xiaomin, et al. Seismic sedimentology characteristics of sub-clinoformal shallow-water meandering river delta: A case from the Suning area of Raoyang sag in Jizhong depression, Bohai Bay Basin, NE China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(5): 566-576.]
- [136] Bridge J S, Alexander J, Collier R E L, et al. Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point bar deposits in three dimensions[J]. Sedimentology, 1995, 42(6): 839-852.
- [137] Bridge J, Collier R, Alexander J. Large-scale structure of Calamus River deposits (Nebraska, USA) revealed using ground-penetrating radar[J]. Sedimentology, 1998, 45(6): 977-988.
- [138] Fielding C R, Alexander J, McDonald R. Sedimentary facies from ground-penetrating radar surveys of the modern, upper Burdekin River of north Queensland, Australia: consequences of extreme discharge fluctuations[M]//Smith N D, Rogers J. Fluvial sedimentology VI. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 1999, 28: 347-362.
- [139] Vandenberghe J, Van overmeeren R A. Ground penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands[J]. Sedimentary Geology, 1999, 128(3/4): 245-270.
- [140] 朱如凯, 白斌, 袁选俊, 等. 利用数字露头模型技术对曲流河三角洲沉积储层特征的研究[J]. 沉积学报, 2013, 31(5): 867-877. [Zhu Rukai, Bai Bin, Yuan Xuanjun, et al. A new approach for outcrop characterization and geostatistical analysis of meandering channels sandbodies within a delta plain setting using digital outcrop models: upper Triassic Yanchang tight sandstone formation, Yanhe outcrop, Ordos Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2013, 31(5): 867-877.]
- [141] 曾齐红, 马乙云, 谢兴, 等. 鄂尔多斯盆地延长组数字露头表层建模方法研究[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 25-29. [Zeng Qihong, Ma Yiyun, Xie Xing, et al. Surface modeling method of digital outcrop of Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 31(5): 25-29.]
- [142] 刘学锋, 马乙云, 曾齐红, 等. 基于数字露头的地质信息提取与分析: 以鄂尔多斯盆地上三叠统延长组杨家沟剖面为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(5): 13-18. [Liu Xuefeng, Ma Yiyun, Zeng Qihong, et al. Geological information extraction and analysis based on digital outcrop: A case of Yangjiagou section of the upper Triassic Yanchang Formation in Ordos Basin[J]. Lithologic Reservoirs, 2015, 27(5): 13-18.]
- [143] 石书缘, 胡素云, 冯文杰, 等. 基于 Google Earth 软件建立曲流河地质知识库[J]. 沉积学报, 2012, 30(5): 869-878. [Shu Shuyuan, Hu Suyun, Feng Wenjie, et al. Building geological knowledge database based on Google Earth software[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(5): 869-878.]
- [144] 乔辉, 王志章, 李莉, 等. 基于卫星影像建立曲流河地质知识库及应用[J]. 现代地质, 2015, 29(6): 1444-1453. [Qiao Hui, Wang Zhizhang, Li Li, et al. Application of geological knowledge database of modern meandering river based on satellite image[J]. Geoscience, 2015, 29(6): 1444-1453.]
- [145] Haldorsen H H, Lake L W. A new approach to shale management in field-scale models[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1984, 24(4): 447-457.
- [146] Deutsch C V, Wang L B. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs[J]. Mathematical Geology, 1996, 28(7): 857-880.
- [147] Deutsch C V, Tran T T. FLUVSIM: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems[J]. Computers & Geosciences, 2002, 28(4): 525-535.
- [148] 尹艳树. 层次建模方法及其在河流相储层建筑结构建模中的应用[J]. 石油地质与工程, 2011, 25(6): 1-4. [Yin Yanshu. Hierarchical modeling method and its application in the construction of fluvial architectural elements model[J]. Petroleum Geology and Engineering, 2011, 25(6): 1-4.]
- [149] 李少华, 刘显太, 王军, 等. 基于沉积过程建模算法 Alluvsim 的改进[J]. 石油学报, 2013, 34(1): 140-144. [Li Shaohua, Liu Xiantai, Wang Jun, et al. Improvement of the Alluvsim algorithm modeling based on depositional processes[J]. Acta Petrolei Sinica, 2013, 34(1): 140-144.]
- [150] 舒晓, 赵永军, 王兵杰. 基于过程模拟的点坝砂体内部构型训练图象生成方法[J]. 长江大学学报(自科版), 2013, 10(26): 33-36. [Shu Xiao, Zhao Yongjun, Wang Bingjie. Method for generating internal configuration training image of point bar sand body based on process simulation[J]. Journal of Yangtze University (Natural Science Edition), 2013, 10(26): 33-36.]
- [151] 赵永军, 舒晓, 胡勇, 等. 一种复杂曲流带储层三维构型建模新方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2015, 39(1): 1-7. [Zhao Yongjun, Shu Xiao, Hu Yong, et al. A new 3D architecture modeling method of complex meander belt reservoir[J]. Journal of China University of Petroleum (Natural Science Edition), 2015, 39(1): 1-7.]
- [152] 钱宁, 万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 30-300. [Qian Ning, Wan Zhaohui. Mechanics of sediment transport[M]. Beijing: Science Press, 1983: 30-300.]
- [153] 张瑞瑾, 谢鉴衡, 陈文彪. 河流动力学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007, 137-353. [Zhang Ruijin, Xie Jianheng, Chen Wenbiao. River dynamics[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 137-353.]
- [154] 王光谦, 张红武, 夏军强. 游荡型河流演变及模拟[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 238-449. [Wang Guangqian, Zhang Hongwu, Xia Junqiang. Evolution and simulation of wandering river[M]. Beijing: Science Press, 2005: 238-449.]
- [155] 赖志云, 张金亮. 中生代断陷湖盆沉积学研究及沉积模拟实

- 验[M]. 西安:西北大学出版社, 1994: 54-120. [Lai Zhiyun, Zhang Jinliang. Mesozoic faulted lacustrine basin sedimentology research and simulation experiment[M]. Xi'an: Northwestern University Press, 1994: 54-120.]
- [156] 张春生, 刘忠保, 施冬, 等. 三角洲分流河道及河口坝形成过程的物理模拟[J]. 地学前缘, 2000, 7(3): 168-176. [Zhang Chunsheng, Liu Zhongbao, Shi Dong, et al. Physical simulation of formation process in distributary channels and debouch bars in delta[J]. Earth Science Frontiers, 2000, 7(3): 168-176.]
- [157] 刘忠保, 龚文平, 张春生, 等. 沉积物重力流砂体形成及分布的沉积模拟试验研究[J]. 石油天然气学报, 2006, 28(3): 20-22, 442-443. [Liu Zhongbao, Gong Wenping, Zhang Chunsheng, et al. Experimental study on sedimentary modeling on the formation and distribution of gravity flow sandbody[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2006, 28(3): 20-22, 442-443.]
- [158] 刘忠保, 王新海. 浊积砂体形成与分布的沉积模拟[M]. 北京: 石油工业出版社, 2010: 54-120. [Liu Zhongbao, Wang Xinhai. Sedimentary simulation of formation and distribution of turbidity sand bodies[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010: 54-120.]
- [159] 常维娜. 利用指纹技术识别流域泥沙与颗粒态磷来源: 以九乡河上游流域为例[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014. [Chang Weina. Sediment sources and particulate phosphorus sources apportionment in a small catchment of the Upper Jiuxiang River using composite fingerprinting[D]. Nanjing: Nanjing Information Engineering University, 2014.]
- [160] 王成玲. 沂河中游 7900a B.P. -2600a B.P. 气候变化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012. [Wang Chengling. Climate variations during 7900a B.P. -2600a B.P. in the regions along the middle reaches of Yi River[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012.]
- [161] 张心昱, 王秋兵. 应用<sup>137</sup>Cs 技术调查河漫滩沉积物的研究进展[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 149-151. [Zhang Xinyu, Wang Qiubing. Advances on uses of <sup>137</sup>Cs technique to investigate the sediments on river floodplains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 149-151.]

## From End Member to Continuum: Review of fluvial facies model research

ZHANG ChangMin, ZHU Rui, ZHAO Kang, HU Wei, YIN YanShu, LI ShaoHua, YIN TaiJu

College of Geoscience, Yangtze University, Wuhan 430100, China

**Abstract:** This paper reviewed recent development in the areas including river pattern classification, channel evolution and transformation, fluvial channel architectural elements distribution, overbank deposition, ephemeral river and distributive fluvial system, fluvial facies models, and new technologies for fluvial sedimentological research. The authors concluded that fluvial sedimentology has witnessed significant improvement in the theory and the methodology since the past two decades. Some geomorphologists, sedimentologists, and engineers recognize a continuum of channel forms rather than only several tens of end members. Channel transitions are controlled by river bed gradient, variations in river discharge, composition of river bank materials, climate, vegetation and tectonic activities along their courses. Vertical profile analysis has great difficulties in differentiating ancient fluvial channel pattern in rock record. Therefore, macro-form geometrical reconstruction based on analysis of architectural element may be the right way to recognize ancestral river pattern and construct fluvial facies model. Overbank deposits record most complete information regarding ancient floods and palaeoenvironmental, palaeoclimatic and palaeontological information of a river. Ephemeral, seasonal, and strong monsoon-affected tropical and sub-tropical rivers have unique sedimentary structures and architectural elements. Distributive fluvial system (DFS) has been received more attentions though it has some doubts. Chinese fluvial sedimentologists need to investigate more modern rivers to observe their geomorphological characteristics and depositional processes, and should refer the quantitative methods of river evolution research and integrate them with sedimentological methods. We should build up the database in fluvial architectural element by using outcrop anatomy, 3D seismic and GPR technology. We should improve our research about overbank and floodplain processes, as well as the depositional regime of rivers in different climate zones. We need to develop new techniques, strengthen research team and laboratory construction, and enhance international exchange and cooperation. The ultimate objective is to make Chinese fluvial sedimentology to provide more strong and effective support for national social and economic development, and to make our own contributions to the development of fluvial sedimentology in the world.

**Key words:** river; fluvial sedimentology; fluvial channel; architectural element; facies model; review