

文章编号:1000-0550(2017)06-1097-13

doi: 10.14027/j.cnki.cjxb.2017.06.002

河流沉积学研究热点与进展 ——第11届国际河流沉积学大会综述

高志勇^{1,2},石雨昕^{1,2},毛治国^{1,2},冯佳睿^{1,2},崔京钢^{1,2}

1.中国石油勘探开发研究院实验研究中心,北京 100083

2.提高石油采收率国家重点实验室,北京 100083

摘要 第11届国际河流沉积学大会于2017年7月17日—21日在加拿大卡尔加里大学举行,每四年举行一次的国际河流沉积学学术会议,吸引了当今北美、欧洲、澳洲及亚洲从事河流沉积学及相关学科研究的众多知名学者参会,研究成果充分体现了当前国际河流沉积学研究取得的重要进展和发展方向。重要进展有:1)河流动力学及其变化过程研究。其中包括将今论古法论现代河流沉积过程与古老地层对比,河道—洪泛平原体系的越岸复合沉积动力学,河流动力学与变化过程研究展望,恢复河道迁移过程:新一代平面图演化模式的讨论,冲积河流和基岩河流的湍流、颗粒间作用和沉积作用;2)陆缘河流。包括河流入海处的地貌动力学与沉积学,河流补给边缘的沉积物搬运、地貌和地层特征,干旱地区河流、冲积扇体系与风的相互作用,植被生长前、无植物生长、或是植被发育区河流的沉积过程研究;3)河流沉积地层及其地下资源。包括源—汇系统,“河流相模式”是否有用的讨论,辫状河、网状河、曲流河概念的厘定等;4)河流地貌变化。包括气候改变、泥泞植被洪泛平原等对河流沉积物通量、河流模式等产生影响,河道中冲积岛屿的演化和稳定河流的蛇曲化,河流环境中沉积物生物作用等。基于上述资料分析,认为河流演化过程从定性向量化研究,物理模拟与数值模拟技术是河流沉积学研究不可或缺的手段,应用定量建模、数学计算等方法进行精准研究,碎屑锆石 U-Pb 定年技术是新一代从源到汇研究的重要工具等诸多方面,是我国学者应该重视并开展研究的方向。

关键词 河流沉积学;研究热点;研究方向;国际河流沉积学大会

第一作者简介 高志勇,男,1974年出生,高级工程师,沉积学及油气储层地质,E-mail: gzybox@163.com

中图分类号 P512.2 **文献标识码** A

1 概述

开展河流沉积学研究不但具有重要的理论意义,而且对生产实践和洪灾防治具有重要的指导作用。1977年召开了由沉积地质学家、河流工程学家和地貌学家参加的第一届国际河流沉积学大会,此后每四年举行一次^[1]。第十一届国际河流沉积学大会于2017年7月17日至7月21日在加拿大阿尔伯达省卡尔加里大学召开,历时5天,中间1天安排野外考察。来自世界各地200多名学者参加会议,参会的学者分别来自加拿大、美国、英国、澳大利亚、荷兰、意大利、西班牙、瑞士、中国、印度、日本、韩国等多个国家。参加会议的中国学者主要来自中国石油勘探开发研究院、中国地质大学(北京)、中国科学院、西南石油大学等多家单位。会议共收集了177篇有关河流沉积等方面的高质量论文,邀请了河流沉积学研究的著名专家 Nanson *et al.*^[2]、Sanjeev^[3]、Miall^[4] 和

Church^[5]做了4个大会主旨发言。大会主要围绕河流动力学及其变化过程(River Dynamics and Change)、陆缘河流(Rivers on the Edge)、河流沉积地层及其地下资源(Fluvial Stratigraphy and Subsurface Resources)、河流地貌变化(Managing Fluvial Landscapes)等4个主题开展学术交流。会议特邀报告5篇,口头交流报告130个,展板交流53版。

大会共设置了4个主题、25个专题(表1)。主题1,河流动力学及其变化;专题1(RDC-1)将今论古法论河流沉积;致敬 Derald Smith;专题2(RDC-2)河道—洪泛平原体系的越岸复合沉积动力学;专题3(RDC-3)从微观到宏观:湍流、颗粒间相互作用于沉积作用间的耦合关系;专题4(RDC-4)半冲积河流与基岩河流的地貌动力学;专题5(RDC-5)有机物在冲积体系中的作用;专题6(RDC-6)恢复河道迁移过程:建立具预测性河道平面演化模式;专题7(RDC-7)研究河流动力学及其变化的主要贡献;主题2,陆

收稿日期:2017-08-22;收修改稿日期:2017-08-28

基金项目:国家科技重大专项(2016ZX05003-001);中国石油股份公司课题(2016B-0502,2016B-0302)[**Foundation:** National Science and Technology Major Project, No. 2016ZX05003-001; PetroChina Science and Technology Project, No. 2016B-0502, 2016B-0302]

缘河流:专题 1(RE-1)河流入海处的地貌动力学与沉积学;专题 2(RE-2)是植被生长前、无植物生长、或是植被发育区河流? 沉积过程研究;专题 3(RE-3)干旱地区河流、冲积扇体系与风的相互作用;专题 4(RE-4)河流补给边缘的沉积物搬运、地貌和地层特征;专题 5(RE-5)陆缘河流的主要贡献。主题 3, 河流地层学及地下资源:专题 1(FSSR-1)河流、三角洲体系的发育规模、分布及连通性讨论;专题 2(FSSR-2)河流沉积解译及地层预测法恢复古地貌;专题 3(FSSR-3)数据及建立实验模型法恢复古环境;专题 4(FSSR-4)河道构型控制及储层连通性;专题 5(FSSR-5)全球地下资源分析:自 McMurray 组到 Mungaroo 组;专题 6(FSSR-6)分散负载—控制沉积物的提取和质量平衡;专题 7(FSSR-7)河流和三角洲决口内外控制因素及冲积构型;专题 8(FSSR-8)河流地层学及地下资源的主要贡献。主题 4, 河流地貌变化:专题 1(MFL-1)有机物在冲积体系中的作用;专题 2(MFL-2)河流对气候改变及人类干扰的响应;专题 3(MFL-3)河流和三角洲的结构和动力学特征;专题 4(MFL-4)河流环

境中沉积物生物固结作用;专题 5(MFL-5)研究河流地貌变化的意义所在。

2 河流沉积学研究热点与进展

2.1 河流动力学及其变化过程

该主题主要围绕河流相沉积地貌特征与演化过程展开讨论,共设置了 37 篇口头报告,14 个展板展示。澳大利亚伍伦贡大学著名学者 Nanson^[2]做了题为“理论地貌学的进步与成果理解全球河流沉积地层学”的主题报告,报告针对全球大多数河流的动能过剩、河道的最小调整原则、河流演化与有机物演化的殊途同归,将今论古法研究河流地层的合理性、支流的层序地层学与正常主河道类比的相关性五个问题进行讨论。他提出 LAP(least action principle)最小调整原则及理论化河道的自我调整过程。

2.1.1 将今论古论现代河流沉积过程与古老地层对比

随着油气等资源勘探的进一步深入,岩性油气藏日益成为勘探重点。曲流河河道砂体物性好、产量高,在岩性油气藏勘探中占有重要地位。但是曲流河

表 1 第 11 届国际河流沉积学大会专题代号、名称及与主题划分

Table 1 Symposia codes and names in the 11th International conference on fluvial sedimentology and theme division

主题	专题号	专题内容
主题 1 河流动力学及其变化	RDC-1	将今论古法论河流沉积;致敬 Derald Smith
	RDC-2	河道—洪泛平原体系的越岸复合沉积动力学
	RDC-3	从微观到宏观:湍流、颗粒间相互作用于沉积作用间的耦合关系
	RDC-4	半冲积河流与基岩河流的地貌动力学
	RDC-5	有机物在冲积体系中的作用
	RDC-6	恢复河道迁移过程:建立具预测性河道平面演化模式
	RDC-7	研究河流动力学及其变化的主要贡献
主题 2 陆缘河流	RE-1	河流入海处的地貌动力学与沉积学
	RE-2	植被生长前、无植物生长、或是植被发育区河流? 沉积过程研究
	RE-3	干旱地区河流、冲积扇体系与风的相互作用
	RE-4	河流补给边缘的沉积物搬运、地貌和地层特征
	RE-5	研究陆缘河流的主要贡献
主题 3 河流地层学及地下资源	FSSR-1	河流、三角洲体系的发育规模、分布及连通性讨论
	FSSR-2	河流沉积解译及地层预测法恢复古地貌
	FSSR-3	数据及建立实验模型法恢复古环境
	FSSR-4	河道构型控制及储层连通性
	FSSR-5	世界地下资源分析:自 McMurray 组到 Mungaroo 组
	FSSR-6	分散负载—控制沉积物的提取和质量平衡
	FSSR-7	河流和三角洲决口内外控制因素及冲积构型
	FSSR-8	研究河流地层学及地下资源的主要贡献
主题 4 河流地貌变化	MFL-1	有机物在冲积体系中的作用
	MFL-2	河流对气候改变及人类干扰的响应
	MFL-3	河流和三角洲的结构和动力学特征
	MFL-4	河流环境中沉积物生物固结作用
	MFL-5	研究河流地貌变化的意义所在

河道及点坝横向变化快、分布不集中、勘探难度大。主要原因是缺少对曲流河沉积微相的精细描述。本次会议来自欧美的沉积学者对点坝的形态、结构、演化过程进行了详细的分析。

地质学家普遍认为“现在是了解过去的钥匙”,利用现代沉积考察是认识沉积特征,建立沉积模式的最基本、最有效的方法。加拿大卡尔加里大学学者 Hubbard *et al.*^[6] 针对曲流河凹岸阶地与反向坝进行研究。早在 1983 年, Lewin 就总结了反向坝的 3 点沉积特征: 1) 由泥和粉砂组成; 2) 侧向加积与下游河道转化有关; 3) 点坝的沉积物由粗粒向下游逐渐变细。Hubbard 在前人研究的基础上, 认为凹岸阶地在地层记录中, 可在与其对应的反向坝沉积序列中显现, 且凹岸阶地广泛分布于曲流河弯中, 因此, 认为多与凹岸阶地共生的反向坝应广泛发育。同时指出前人对于凹岸阶地与所对应的反向坝的研究并不成熟, 可以利用对古环境精细解译和储层类型划分进一步提高对反向坝的识别。另一位来自卡尔加里大学的学者 Hagstrom *et al.*^[7] 认为, 前人太多关注凹岸侵蚀, 而忽略凸岸的侵蚀。关于凸岸点坝砂体侵蚀的报道很少, 凸岸点坝侵蚀直接造成了地层的不连续性。通过对加拿大阿尔伯达省东北部白垩系 McMurray 组油砂岩的三维地震资料解释, 识别出了点坝及其之间的侵蚀面。点坝复合砂体之间侵蚀面上下的岩性是发生变化的, 点坝的岩性及厚度变化对于油气资源勘探十分重要, 它的迁移伴随着凹岸侵蚀与凸岸堆积, 而点坝间的侵蚀是很容易形成的, 比如一次洪水或风暴。

2.1.2 河道—洪泛平原体系的越岸复合沉积动力学

我国中国科学院黄河清教授等^[8], 将发生自 20 世纪 50 年代以来黄河下游所有的特大型洪水分为三类: 大型越岸洪泛、小型越岸洪泛和无越岸洪泛。为了确定黄河下游主要和次要的洪泛平原上以及满槽河道内的沉积物分布, 设置了一种由通过整合横剖面法和输沙量法组成的计算方法。计算结果表明, 当大型越岸洪泛发生时, 泥沙输运系数一般小于 0.034, 满槽河道受到严重侵蚀, 主要和次要的冲积平原上都接受沉积。在小型越岸洪泛发生时, 满槽河道受到侵蚀时的泥沙输运系数小于 0.028, 此时大量的沙泥质沉积于次要平原上, 沉积的泥沙量仅与水流含沙量密切相关。在无越岸洪泛发生时, 满槽河道受侵蚀时的含沙量一般小于 50 kg/m³。美国印第安纳大学学者 Czuba *et al.*^[9] 通过构建二维数值模型, 定量计算洪泛平原河道的水动力和彼此连通性。数值模型模拟了

水流深度和流速, 用以定量分析洪泛平原河道间的连通性, 主河道与洪泛平原漫滩河道之间的连通性, 以及水在洪泛平原上的停留时间、河道下切及沉积潜力。模拟结果表明, 洪泛平原漫滩河道传送量约占流量的 50%, 被认为是“满槽流量”。

2.1.3 河流动力学与变化过程研究展望

受邀参会的加拿大达尔豪斯大学学者 Gibling^[10] 报告了地质时间上的河流历史, 及对全球范围的大型河流起源及发展的研究成果。认为现代河流很少有形成于联合古陆破裂之前, 更没有早于侏罗纪的河流。很多大型现代河流形成于侏罗纪到白垩纪古陆破裂时期, 并保存在不受造山带和冰川作用影响的地区。位于喜马拉雅与阿尔卑斯造山带的许多大型河流都形成于中新世或更晚。印度河起源于始新世的印度洋板块与亚欧板块的碰撞, 最初可能流入中亚。恒河于 15 Ma 前可能是向东流, 随着印度半岛俯冲形成了印度河与恒河的分水岭。亚马逊河在 11 Ma 前随安第斯山脉隆升, 流向发生了倒转, 在 7 Ma 与大西洋连通。同样受邀参会的美国犹他大学学者 Rittenour^[11] 对美国阿罗约百年未明确的陡坎水道成因机理做出阐述, 通过分析犹他州南部五个相邻集水区的年代地层学和流域平均侵蚀速率, 以及根据 AMS 放射性碳年代和单粒光释光测年技术 (optically stimulated luminescence, OSL) 测定的冲积沉积物定年数据, 认为宇宙放射性核素铍的侵蚀率是来自于现代、全新世和更新世的冲积物和塌积物。利用铍的流域平均侵蚀速率在不同集水区测定海拔、坡度和基岩的类型, 得出随着河流流量的降低, 沉积物沉降, 河流系统的动力学稳定性被破坏, 阿罗约陡坎型水道逐步形成的原因。

2.1.4 恢复河道迁移过程: 新一代平面图演化模式的讨论

英国利兹大学 Yan *et al.*^[12] 通过建立地层三维模型, 预测河流的相模式与演化过程。运用曲流河点坝沉积结构模型 (PB-SAND) 结合河流沉积过程与河流形态随机建模, 该方法通过大量收集实测的沉积学数据并存储于数据库中, 预测河道内部结构和点坝形态等。河流沉积序列通常具有垂向和横向非均质性, 利用 PB-SAND 可以更为精确的三维恢复及预测河流蛇曲弯道的演化。法国洛林大学学者 Parquer *et al.*^[13] 利用半自动化模型模拟全球古几何体的年代学特征。该模型适用于曲流河中的每半个蛇曲河弯的模拟, 是通过曲流河的最晚一期形成的河湾, 进行反向三维

迭代从而得出河道迁移过程而建立。此模型已经应用于加拿大的 McMurray 组油砂的地震图上。该方法的随机性,可弥补天然河道迁移及其不可逆性,有助于更好地评估废弃河道的年龄和内部结构变化的不确定性。

2.1.5 冲积河流和基岩河流的湍流、颗粒间作用和沉积作用

美国亚利桑那州立大学学者 Leary *et al.*^[14]开展了河床的输沙机理及定量分析河流的泥沙通量的研究。通过在科罗拉多河大峡谷收集高分辨率的河床迁移数据,数据集包括沿科罗拉多河到上游的钻石溪 USGS 多波束声纳测量仪收集的3个不同的流量排放数据(283 m³/s, 566 m³/s, 1 076 m³/s)。每6分钟收集一次数据,连续12小时。实验中,提取的详细地形数据(即河床底形高度,波长)和每次水流泥沙通量的一套单底形特征。对数据进行耦合、质量平衡计算,结果表明,沙丘的交叉搬运造成沙丘平面形状的变化。德克萨斯大学奥斯汀分校的 Spector *et al.*^[15]认为了解不同河流环境中基岩的溶解与磨蚀的控制因素是很有必要的。传统上认为,河流的化学溶蚀和侵蚀作用与河流被机械侵蚀相比可以忽略不计,如河床底负载沉积物在搬运过程中,河床基岩受到沉积物的冲击、磨蚀(impact wear)。然而,对于相对可溶的基岩岩石,例如碳酸盐岩,溶解侵蚀的作用不可小视。溶解作用可以增加河床被溶蚀区域的粗糙度,并可提高磨蚀效率,磨蚀会与湍流共同作用导致更大范围的溶解。通过水槽模拟实验,验证了溶解作用可产生短波长的粗糙底形,同样增加了水力粗糙度。在实验所测量的参数中,这种河床底部表面的溶蚀有进一步增强趋势。

2.2 陆缘河流

本次大会与陆缘河流相关的口头报告共计32篇,展板7篇。该主题的研究成果主要体现在对现代沉积的河流与海洋、河流与湖泊交互环境下,以及干旱地区河流、冲积扇及风成作用环境下的地貌学、沉积动力学与地层特征等多方面。来自英国伦敦帝国理工学院的 Sanjeev^[3]教授做了题为“好奇号火星车探索火星上的河流—湖泊沉积体系”的主题报告。Sanjeev 教授及其研究团队通过近5年的资料整理与收集,认为好奇号火星车采集的火星上的岩石样品至少形成于(3.7±0.1)Ga。对岩石样品进行精细的沉积学、地层学及地球化学分析后,认为火星车探索的 Aeolis Mons 山高3 000 m,对探测车拍摄的野外露头

卫星图片进行地质分析后认为,该套沉积地层的底部发育冲积扇砾岩,向上为具交错层理的河流相砂岩,三角洲相砂岩,湖相泥岩和风成砂岩。通过做图分析此套沉积序列的垂向变化,认为其具有从河流—三角洲沉积,向上演化为具有广阔湖水面的湖相细纹层状泥岩沉积。反映当时的古气候为温暖、潮湿,且长时期发育湖泊。现今争论的焦点在于火星的地质演化过程中,上述的古气候特征是如何形成的。

2.2.1 河流入海处的地貌动力学与沉积学

荷兰学者 Kleinhans *et al.*^[16]通过运用数值模拟、物理模拟实验及地质重建等技术,模拟在荷兰海岸平原上的河口区,富泥、富沙河流在不同区域内潮汐与河流相互作用的特征与机理。结果显示,植被阻力主要集中在通道上,稳定了坝体与堤岸。堤岸的加速收缩,并提供足够的河流沉积物输入。泥土大多堆积在植被之后,然而,泥质主要沉积在河口区最高部位的河口侧翼,而不是在河口中部的坝体上。丰富的河流沉积物(沙泥质)逐渐填满整个系统直到三角洲形成。印度学者 D'Alpaos *et al.*^[17]认为分支河道和曲流河道在河流和潮汐环境中非常发育,运用二维、三维数值模拟技术,分析河流与潮汐相互作用,特别是在不同水流方向的变化下,曲流河中坝体的形态特征及多年演化的结果。认为侧向支流可以在蛇曲拐弯处影响沉积砂体的叠加样式,它们的影响结果可保存于沉积记录中。韩国学者 Choi *et al.*^[18]对接近旱季潮位、具有高弯曲度、受潮汐调节作用影响的 Sittaung 河进行了深入的地质调查,通过在现代沉积剖面中识别出的河流洪水下的沙质沉积物,以及潮汐退潮作用下的沙泥质沉积物,二者相互叠置呈互层状分布。日本学者 Gugliotta *et al.*^[19]对越南湄公河三角洲的河流与海洋过渡带的岩相和沉积相进行了研究,通过对河道内沉积物样品分析,河道形态的刻画,盐度分析和贝壳特征研究,认为在雨季海水的影响范围可向湄公河上游追溯15 km,在干旱季,海水的影响范围可达50 km。河流与海洋过渡带内的河道沉积是由河流的上游河道、洪泛影响带、河流的下游河道、潮汐影响带等构成。河流带来的洪水与海洋的潮汐作用,共同控制了河流与海洋过渡带内的沉积物组成与沉积相类型。美国学者 Plink-Bjorklund *et al.*^[20]对潮控三角洲中的河流与潮汐沉积转换带的地貌动力学进行了回顾,提出河流至潮汐转换带的地貌动力学是复杂的,受河流动力学与潮汐发展过程、沉积物体积、咸水与

淡水相互作用,以及海岸带内地形的影响,河流与潮汐水道等自身多因素控制。现代和古代潮控三角洲中的河流与潮汐作用的转换带,是河道下切逐渐增加以及分流河道内沉积物高效输送的发育区。Prokocki *et al.*^[21] 针对美国 Lower Columbia 河的河流—潮汐作用转换带内的辫状坝开展了研究,运用高分辨率探地雷达技术、浅钻岩芯技术,建立了多条探地雷达剖面并获取大量的浅钻井岩芯,进而分析辫状坝的形态、生长过程、砂体叠置特征。该研究成果首次阐述了在洪水—潮汐作用、盆内的风能—波浪作用有机结合下,重塑冲积体系结构和河流—潮汐作用转换带坝体形成特征的重要性。西班牙学者 Ghinassi *et al.*^[22] 对西班牙 Pyrenees 地区白垩系 Tremp 组潮汐作用控制的点坝沉积体进行研究,通过对点坝砂体的三维摄影测量模型分析和多项野外露头关键地质因素研究,认为在河流与潮汐共同作用下,古水流对曲流河点坝砂体砂质颗粒大小与展布有三种控制作用:1) 不常见的沿着坝体向海的方向,砂质颗粒粒级变小;2) 较常见的坝体砂质具有向上变粗的趋势;3) 多数情况下,古水流指向坝体的弯曲顶点带。意大利学者 Ronchi *et al.*^[23] 对意大利爱琴海西北部的 Piave 和 Tagliamento 巨型扇体的下切谷特征进行了研究,认为该地区 13.8 ka 以来的下切谷宽度可达 2 km,深度可达 30 m。针对多个下切谷的古地理研究及重建,对全新世的相对海平面上升研究有较好的帮助。

美国的一些学者对位于印度、孟加拉国的恒河,特别是恒河与海洋过渡带的现代沉积开展了大量的研究工作。Best *et al.*^[24] 对 Ganges-Brahmaputra-Meghna(恒河)潮汐三角洲的下切河道的形态与深度进行了实地测量,认为由河流上游至入海处,由于缺乏泥沙等沉积物,在河流所带来的洪水水流与潮汐引起的强烈潮流综合作用下,河流上游的下切河道深度可达 50 m,向下游下切河道的深度逐渐变小,下游区下切河道的深度可达 12 m 左右。Hale *et al.*^[25] 对恒河三角洲红树林中沉积物堆积及其控制因素进行了研究,包括悬浮沙质浓度,淹没频率,持续时间和深度,沉积物的粒径以及洪水与海洋潮汐水流量等。Wilson *et al.*^[26] 通过对比分析恒河三角洲东部的构造活动带 Sylhet 盆地和现代的 Jamuna 河潮汐三角洲平原上的辫状河道带内向下游方向的、颗粒变细的河流沉积物,认为沉积坡度的变化,导致了在潮汐回流作用下沉积物粒径的变小,沉积坡度由 1.1×10^{-4} 变为了 2.9×10^{-5} 。

2.2.2 河流补给边缘的沉积物搬运、地貌和地层特征

美国学者 Howe *et al.*^[27] 提出有些广泛分布的三角洲并不与经典的三角洲定义相吻合,并不是传统意义上的三角洲沉积(the default delta is not a delta)。广大学者所默认的河控型三角洲的最主要特征是三角洲要有分叉河道,且朵叶体横向迁移展布,河控型三角洲这一概念的形成亦基于此,且考察的很多三角洲也符合这一特征。但是,纵观自然界与人工湖泊中形成的三角洲,由没有分叉的、单一河道形成的三角洲在湖盆中也是相当发育的。他们认为,事实上的三角洲形态学特征是河流通道形成一个单线,进积通道进入盆地,而不带分叉作为河流的基底延伸。此种直线型的三角洲的形态是由于悬浮泥沙造成河道内沉积物粒径偏细,且含量超过砂质的原因造成。细粒的富泥的沉积物淤积在河口,沙质则沉积在河道中部和坝体的侧翼。进积的富泥沉积物堆积在河口,河道就像炮筒(gun barrel)一样没有分支,易形成扇体,即与传统定义上的三角洲不一致,不是真正意义上的三角洲,就像炮筒(gun barrel)一样,形成扇体而已。美国学者 Smith *et al.*^[28] 通过建立美国 Darby 河回流洪水的地质模型变化及沉积物搬运的二维水动力耦合模型,描述了流量速度场和深度估计泥沙运输,并运用激光雷达和测量的测深数据,模拟水流的水力特性,计算输沙量。该成果可用于在回水平原上沉积物的运输和沉积物的储存有更深入的了解。美国学者 Overeem *et al.*^[29] 重新定义了河流沉积物浓度和浊流触发机制的临界值。通过使用受季节变化控制的河流沉积物搬运模型,来明确触发浊流机制的临界值。认为高密度浊流在流量超过 $450 \text{ m}^3/\text{s}$ 时开始形成,且在模拟的 Squamish 河中全天超过了 13% 的概率发生。模型预测出的结果也表示每天水流量沉积物浓度平均仅为 $(1 \sim 3) \text{ kg}/\text{m}^3$ 。这也意味着每天河口水动力比我们以前所认知的更为重要。所给出的平均浓度的潮汐调节作用,有能力增加河口和三角洲的坡度。

2.2.3 干旱地区河流、冲积扇体系与风的相互作用

英国学者 Carling *et al.*^[30] 对印度 Thar 荒漠区干旱环境下现代的 Luni 河的沉积特征进行了研究。该条河流的雨季河水流量峰值可达 $14\,000 \text{ m}^3/\text{s}$,并携带大量泥沙沉积于河床之中。研究区内大量的细砂质出现在整个 5 m 深的河道内,沉积构造较为典型,包括有平行层理、沙纹层理等,与风成作用有关,与水

流相关的波纹层理不发育。该研究成果充分展现了在干旱环境下的河流相沉积特点,在河流沉积基础上受风力改造的沉积特征相当明显。印度学者 Bordy *et al.*^[31]对南非 Main Karoo 盆地 Cape 山前冲断带的多个巨型扇的成因机制进行了研究。通过运用定量相分析、地球化学分析等方法,调查研究了 End-Capitanian 地区不为人知的古生物化石记录,进而判断地层沉积间断时间。160 Ma 以前的河流相沉积地层厚 600 m,这套厚 600 m 的地层沉积时间为 2.0~2.5 Myr。Bordy *et al.*^[31]试图将构造和气候控制与河流结构区分开来,发现了持续的沉积物来源,不变的古水流,在沉积过程中不变的干旱古气候等因素发挥了重要作用。巴西学者 Santos *et al.*^[32]认为现今学者们已经认识到无植被发育的沉积环境也是很重要的,这是因为对于大多数在地球早期历史(30 亿年前)中,大陆的地貌缺乏陆地植物和沉积过程的相互作用。该学者分别总结了曲流河上植被发育特征及其在世界上的分布情况,分为无植被,植被发育<5%,植被发育 5%~10%与 10%~25%等 4 种条件进行归纳总结。大量的统计数据显示,现代稀疏和无植被发育的曲流河在很大的坡度范围内发生坡度、盆地性质、宽阔的水流通道变化以及宽广的曲流河道带沉积。进而认为植被的多少,对河流沉积性质具有重要的影响,以前的认识可能有所低估了。澳大利亚学者 Cohen *et al.*^[33]通过对澳大利亚干旱内陆的现代沉积剖面分析,特别是定年分析,来确定在干旱内陆环境下的河流与湖盆间的相互作用关系。来自中国石油勘探开发研究院的高志勇等^[34],对中国新疆焉耆盆地现代河流、冲积扇、扇三角洲的沉积体系中的砾石特征及其展布进行了研究,认为焉耆盆地博斯腾湖北部河流、冲积扇及扇三角洲中有大量砾石分布,河流沉积环境下,成分为粉细砂岩、凝灰岩、混合岩等砾石搬运距离大于 80~100 km 后,演化为砂质,砾石长轴直径减少了 90%以上。在冲积扇及扇三角洲沉积环境中,成分为混合岩、细砂岩、脉石英的砾石搬运距离为 20 km 左右,砾石长轴直径减少了 67%~75%。沉积坡度、水流速等因素控制了河流、冲积扇及扇三角洲中砾石径的降低。

2.2.4 植被生长前、无植物生长、或是植被发育区河流? 沉积过程研究

英国学者 Davies *et al.*^[35]对冲积层中植被的影响及其作用进行了研究,提出在现代沉积中,动物、植物对沉积物及沉积作用的影响是显而易见的。但在古

代沉积中,动植物对沉积作用及沉积物影响的研究远没有构造、古气候等对沉积控制作用研究的透彻与深入。在比较小的尺度内,动植物对沉积作用的影响在野外露头中是可以识别并观测到的。在全球的尺度内,陆生植物的演化改变了地球表面的功能。该专题中,部分学者在矿床学与沉积学研究有益结合方面取得了一些重要进展。加拿大学者 Noad^[36]认为南非城市 Welkom 地下的太古代沉积中黄金的产量占世界的 20%以上。黄金是从相对薄层的、呈砾岩状的石英岩矿脉中产出的,与黄铁矿、铀云母等相伴生。相对纯石英的透镜体沉积在河道内的卵石层的底层。部分的黄金与薄的碳缝合线和浸染的碳有关,砾岩被认为是属于河流或者浅海沉积。通过对相图的编制和明确与其相关的黄金等级,建立了一个发育在主礁内的河道沉积三维模型,该模型提供了分析沉积环境和孔隙度分布的重要数据。Long *et al.*^[37]对 Ontario 地区古元古代早期 Mississagi 组的含金砾岩进行了研究,认为其成因自狭窄河谷内高含沙水流中沉积的河床砾石的成岩。砾石质的辫状河道宽范围从 50 m 到大于 100 m,2~6 m 深,河道内植被不发育。辫状河道内向下游砾石径减小,含金比例最高的砾岩,主要分布在盆地上游。

2.3 河流沉积地层及其地下资源

该主题主要探讨了河流沉积过程中沉积地层的构型及其蕴藏的油气、地下水、地热、矿产等资源分布。共有 37 篇宣讲论文,26 篇展板论文。来自加拿大多伦多大学、河流沉积学研究著名学者 Miall^[4]做了题为“河流沉积学对石油勘探和地层学的贡献”主题报告,认为在 1996 年提出的 16 种河流沉积相模式对石油勘探,甚至包括 3D 地震方法解释河流的沉积特征均有较大贡献。同时,回顾了河流相层序地层学研究进展,认为可容空间的变化受控于构造作用,1990 年代河流层序地层学研究进展迅速。指出现今需运用精细的年代地层方法研究地层学,认为现今所保留下来的地层,只有当时沉积时地层厚度的 10%而已,甚至更小。指出利用碎屑锆石精确定年在板块尺度的源—汇系统中均有重要作用。

2.3.1 源—汇系统

从剥蚀区形成的物源,经过搬运到盆地中沉积下来的这一过程,近一二十年来越来越受到重视。本次会议主要论述了物源如何从山上形成、又如何从剥蚀区搬运至陆架区并最终到深海区沉积下来,有整体概述的,也有就某一方面进行论述。源—汇系统的研究

重点是地球动力学和河流搬运过程,用到无量纲尺度分析和多学科融合的“将今论古”方法。美国堪萨斯大学的 Blum *et al.*^[38] 提出碎屑锆石(U-Pb)定年是新一代研究从源到汇沉积学与地层学的工具。指出从源到汇的基本概念就是沉积物的搬运路径由内陆到盆地,古水系重建能够应用于预测水体流量,沉积物搬运路径和散开方式。例如,通过对墨西哥湾晚白垩世沉积地层中碎屑锆石定年数据的收集与整理,认为墨西哥湾水系被限定在 Appalachian-Ouachita 山脉南部,河流的流域面积可达 10^6 km^2 , 其中最大的河流是位于墨西哥湾东部的古 Tennessee 河。此时,北美大多数的古水系是流向北部的北方海(the Boreal Sea),进而造就了加拿大阿尔伯达省油砂的广泛沉积。近年来,关于河流体系中上游的支流沉积与下游的分流沉积的研究备受关注。碎屑锆石定年的方法可以对沉积地层中的支流、分流加以较好的区分。例如,关于加拿大西部盆地 Aptian McMurray 组沉积相解释的一种观点认为其属于远端河口湾区域受潮汐影响的河流相沉积,且分流河道带较发育。另一种观点认为 Aptian McMurray 组属于河流上游区域、支流较发育的古峡谷沉积。通过对采自该组的碎屑锆石定年数据分析后,认为此数据具有双峰、统计独特性种类的反映多物源的特点,进而认为其具有支流—干流相关水流特征,支持了 McMurray 组具有上游支流沉积的古地理背景。

2.3.2 关于“相模式”是否有用的讨论

许多沉积学家早期提出了很多河流相沉积模式,但是随着理论研究和手段的不断深入,以前的多种相模式并不符合所有地质情况。英国阿伯丁大学的 Hartley *et al.*^[39] 直接提出“辫状的还是蛇曲的? 河流相模式有多大用?”。认为最初辫状河与曲流河的相模式建立于 1970 年代并被广泛应用,即使在 1980 年代就有学者注意到这些模式并不适合,以及很难做到与现代河流及其沉积物的观察结果相吻合。通过对现今沉积盆地中河流体系及其所保留下来的沉积岩石的研究,认为经典的辫状河、曲流河沉积相模式在现今沉积盆地中所特有的和有限区域内是适合的。所争论的焦点在于,通过观察现今终年流水的河流,砂质曲流河的关键特征包括有向下游生长的沙丘和坝体,这些沙丘和坝体由横向迁移的席状复合河道带构成,被认为具有辫状河的特征。在岩石记录中,辫状河沉积体系被过度解释为传统沉积相模式的垂向沉积序列向上变细、单一流系的特征,本身适合的范

围变小。而曲流河沉积则容易造成误解,相模式所适用的范围被认为扩大,特别是在地下数据较为有限的前提下。

2.3.3 辫状河、网状河、曲流河概念的厘定

以美国堪萨斯大学 Blum^[40] 和英国格拉斯哥大学 Owen *et al.*^[41] 为代表的学者,在多篇摘要中都提到对于不同类型河流概念的讨论和厘定,并针对古代地层记录中存在的河流类型现象进行讨论,认为如何利用现代河流沉积和演化模式来研究古代河流已经不是一个简单的“将今论古”的问题,并针对不同河道砂体类型进行讨论,提出从多尺度内部和外部层次构型、建筑结构和几何形态来进行分类。Blum 教授^[40] 认为,多年来学者们都致力于讨论在地层记录中所观察到的特有的河流沉积响应的河型,例如各种端元河型—辫状河、曲流河和网状河的河道样式等,认为由现代辫状河、曲流河及网状河沉积特征所取得的认识,对河流相沉积模式的建立发挥了重要作用。他在摘要中指出,首先,基岩河流与冲积河流影响着当今世界的大陆内部形态。随着陆地表面的抬升,河流沉积造成的河道下切、河流阶地出现,进而在基岩之上出现不整合。与人的直觉不一致的是,这些河流沉积物应当被保留下来。尽管在古代地层中河流阶地较难识别,但基岩之上的不整合是能保留的。其次,通常在野外露头、测井曲线以及 2D 地震剖面中,辫状河道带作为典型特征,存在于早期相模式中。然而,关于在三维地震剖面中解释出辫状砂体叠置样式的报导很少,大量的作者都在质疑其保存下来的可能性。只有极少数的反对者认为,现代的辫状河道沉积出现在造山带前缘或者裂谷两侧的几十公里范围内,并且受粗砂、砾石、沉积坡度超过 0.001 m/m 以及水深小于 5 m 的水体等多因素影响。况且辫状河至曲流河的转换通常伴随着砾石—砂质的转化,更重要的是坡度的降低。鉴于此,认为在现代的下陷式沉积盆地中,辫状砂体叠置样式的存在不具有普遍性。最后认为,流入湖盆或者海洋环境中的河流相沉积物,被广泛的认为其保存下来的可能性很大。

2.3.4 重视河流演化过程的研究

早期许多学者的研究都是静态的,大多是基于某一个点的研究。较多学者^[42-47] 提到了对河流演化过程的研究,例如河流弯曲带的演化、河床地形对沉积物的影响、可容空间的变化、下切谷体系的形成、河口冲积和海岸带沉积的关系等,并且还强调人类对现代河流演化的影响,对人与自然的关系更加重视。

2.3.5 从定性向定量化发展

本次会议中部分学者提出了研究河流沉积学的新方法新技术,例如利用结构要素进行复合交叉重建河流形态、储层参数和砂体特征概论曲线结合、多点地质统计学、三维建模等方法等^[48-51],可以看出这些研究从野外露头的定性描述向室内计算机建模的发展。但是也提到技术发展的同时对基础地质数据精度的要求也提高了,这就需要地质工作者花费更多的精力。

2.4 河流地貌变化

与本主题相关的口头报告共计12篇,展板6篇,来自加拿大大不列颠—哥伦比亚大学的 Church^[5]教授做了题为“从透视图研究河流地貌变化”的主题报告。该主题主要探讨的内容包括河流对气候改变及人类干扰的响应、河流和三角洲的结构和动力学特征、河流环境中沉积物生物胶固结作用等。结合学者们口头报告记录、展板讨论,认为该主题具有三个方面研究重点。

2.4.1 气候改变、泥泞植被洪泛平原等对河流沉积物通量、河流模式等产生影响

为了研究泥土和植被对河流地貌的影响,荷兰学者 Klein Hans *et al.*^[52]根据由滑槽断面主导的法国 Allier 河砾石质河床,设定植物生长和死亡率作为年龄参数,开展了该区植被与沉积过程关系的数值模拟工作。实验反复开展了100多次,涵盖了植被和泥浆参数的范围、上游泥浆供应和入侵物种。研究表明:1)对于具有植被和泥土型,植被决定了泥土在何处沉降;2)洪泛平原上水流较高的剪切应力侵蚀了洪泛区的泥土。英国利兹大学的 Colomera *et al.*^[53]研究了古气候中的温度对沉积作用、河道间侵蚀作用的影响。PETM(古新世—始新世特伦普组最大热量)的纪录开始于古地貌侵蚀缓解时期,沉积物仅限于侵蚀山谷中。在PETM间断开始时期,可观察到河谷充填转变为沉积物广泛发育。与下伏地层相比,PETM间断有以下特征:1)河道沉积物比例很大;2)河道沉积物平均厚度大;3)稳定元素含量增加;4)河道充填物厚度略大;5)跨层砂岩和砾岩的比例增加;6)平行层理砂岩或低角度交错层理砂岩比例减小;7)具交错层理砂岩平均厚度增加。河流地貌变化研究还需要深入了解沉积物流量的大小及其来源。美国怀俄明州立大学 Ashley *et al.*^[54]在前人研究基础上推导出一个幂函数表达式,用数学方法估算位于大峡谷国家公园的科罗拉多河监测站中的河流携带物流通量,

能够有效地、直观地反映在流水、河床粗糙程度和演变的河床颗粒粒度的相互作用下,河流负载物通量的变化。

2.4.2 河道中冲积岛屿的演化和稳定河流的蛇曲化等都是研究热点

波兰学者 Slowik *et al.*^[55]对河流中形成的冲积岛屿及其演化过程进行了研究,提出“冲积岛”(alluvial island)是指河道中的坝体表面不存在或存在植被,特别是具有稳定暴露面的坝体。通过地球物理、地质和 LiDAR 调查,并对历史地图进行了分析研究,探讨匈牙利 Drava 河下游的冲积岛的演变过程。18世纪,冲积岛开始形成于 Drava 河下游,岛屿结构可以区分为上下两层,上层由一套垂向叠置的沙丘(由中沙、细沙质构成)覆盖于水平层状沉积物(中沙、细粉和粉沙质构成)之上。下层由横向展布的冲积层、沙丘组叠置形成。荷兰学者 Candel *et al.*^[56]对荷兰一条低能砂质河流 Overijesselse Vecht 河的蛇曲规模和特征开展了研究,该河的平均水流量和平均河谷坡度均较低,蛇曲化程度很高。研究发现,自公元前1500年始,该流域内水流动力增加,河流形态也从横向向稳定变为蛇曲。初步的光释光测年分析(optically stimulated luminescence, OSL)和放射性碳(¹⁴C)测年显示,该古河道的侧向迁移在最近的曲流化之前的一段时期内是非常有限的。满槽流量的增加可能是小冰期流量变化的结果,当地河岸的不稳定性也可以解释大规模蛇曲的形成。

2.4.3 硅藻生物膜与微生物组合等生物作用与碎屑岩沉积的关系

英国伯明翰大学 Smith *et al.*^[57]教授利用实验模拟出的河道,系统量化生物膜在沉积物基质中的集群作用。与河床底形相比,水平层中硅藻生物膜更易迅速的聚集细沙。无论是细砂还是粗砂,在生物稳定的河床中,泥沙输移阈值都比较高。Smith 等在一个封闭水道中完成了一组模拟实验,该水道配备了4 cm厚的渗透层模型,模型由引导流体方向的水平圆柱体组成,从而构成了理想的二维渗透层。在流动实验之前,该模型保存在独立的生物膜反应器内,用以启动和控制生物膜生长。一旦达到目标生物膜生长阶段,这些模型会被转移到水道中,对过渡流和湍流产生影响。采用长距离微粒子图像测速技术,定量分析生物膜对自由流体湍流结构及地表以下自由流相互作用的影响,认为生物膜对流经或穿透渗透层的流体都会产生影响。英国剑桥大学学者 McMahon^[58],

通过分析法国北部和英国海峡群岛埃迪卡拉—寒武系以及苏格兰西北中元古代 Meall Dearg 组等两个植被发育前的冲积层序,以解决微生物群是否可以在没有植被的情况下在稳定河道中发挥作用。认为上述剖面的研究成果具有相近之处:1) 沉积环境中存在陆生微生物垫的化石证据;2) 冲积层垂向结构充分暴露,为河流沉积物成因精细解释奠定基础。河流沉积层系包括槽交叉分层的红砂岩,具有很少保存的沟道形状,表明沉积作用是由河道内沙丘迁移所主导的。

3 讨论与结语

本次大会聚集了当今北美、欧洲、澳洲及亚洲从事河流沉积学及相关学科研究的顶尖学者,他们的研究成果充分体现了当前河流沉积学研究的主要方向和重要进展,如下方面是需要引起国内学者重视及今后开展研究工作的方向与借鉴:

(1) 针对现代河流沉积,主要采用的研究方法是运用物理模拟、数值模拟技术,开展水动力学分析,地貌学分析,包括坝体形态、河道汇合处地貌形态与水动力特征、河流不同沉积部位的形态,以及沉积物形态、变化及其与水动力关系等。可以说,物理模拟与数值模拟技术是当前国际上河流沉积学研究不可或缺的重要手段。我国从事河流沉积学物理与数值模拟的研究成果也很丰富^[59],因此,国内的学者更要增强信心,沿着此方向深入下去;

(2) 现代河流沉积与古代沉积结合方面,开展新技术与传统方法的结合、多学科交叉研究,以及物理模拟、数值模拟、定量建模技术,进行更为精准细致的研究工作。例如,对曲流河点坝砂体生长过程、蛇曲河湾演化过程的定量建模与正演,即恢复(重建)每一期蛇曲河道演化过程,分析坝体宽窄变化、沉积物粒度粗细、水动力条件变化,并进行形成过程及成因机制的数学计算,可以说各方面的研究进展都诠释了精准研究的精髓。值得一提的是,大量学者将现代沉积分析结果应用到加拿大阿尔伯达省 McMurray 组油砂研究,充分体现了“产学研”的有机结合;

(3) 当前国际河流沉积学的研究,采用了很多新技术,如碎屑锆石 U-Pb 定年技术、放射性碳(¹⁴C)测年技术、光释光测年技术(OSL)等。Miall, Blum 等知名学者都认为碎屑锆石 U-Pb 定年技术是新一代从源到汇沉积分析的重要工具。另外,本次大会关于河流层序地层学方面的研究非常少,正如 Andrew Miall

所讲,现在回顾起来,1990 年代是河流层序地层学发展的迅速时期。

致谢 审稿专家对本文的成稿提供了有益帮助,表示诚挚谢意!

参考文献 (references)

- [1] 王随继,倪晋仁,王光谦. 河流沉积学研究进展及发展趋势[J]. 应用基础与工程科学学报,2000,8(4):362-369. [Wang Suiji, Ni Jinren, Wang Guangqian. The evolution and direction of research in fluvial sedimentology[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2000, 8(4): 362-369.]
- [2] Nanson G, Huang H Q. Advances in theoretical geomorphology and consequences for understanding global fluvial stratigraphy [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary: University of Calgary, 2017: 20.
- [3] Sanjeev G. Exploring fluvial-lacustrine sedimentary systems on mars with the curiosity rover[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary: University of Calgary, 2017: 21.
- [4] Miall A. The contribution of fluvial sedimentology to petroleum exploration and the science of stratigraphy[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary: University of Calgary, 2017: 22.
- [5] Church M. Managing fluvial landscapes: a perspective view[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary: University of Calgary, 2017: 23.
- [6] Hubbard S M, Durkin P R, Holbrook J, et al. The expression of geomorphology in the stratigraphic record: concave-bank benches and counter point bars[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 73.
- [7] Hagstrom C A, Leckie D A. Point bar erosion and the formation of stratal discontinuities in a modern point bar and the fluvial deposits of the McMurray Fm., Alberta, Canada[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 65.
- [8] Huang H Q, Zhang M, Yu G. Characteristics of flood sedimentation in the lower yellow river, China[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 73.
- [9] Czuba J A, David S R, Edmonds D A. Hydrodynamics and connectivity of a channelized floodplain along the meandering east fork white river, Indiana, USA[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary,

- 2017: 46.
- [10] Gibling M R. River history and longevity through geological time; an update[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 61.
- [11] Rittenour T M. Centennial-scale Holocene fluvial dynamics in the Southwest US; linkages to geomorphic thresholds and external forcing[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 101.
- [12] Yan N, Mountney N P, Colomera L, et al. PB-SAND: A stratigraphic model to predict 3D facies arrangements associated with fluvial meander-bend evolution [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 126.
- [13] Parquer M N, Collon P, Caumon G. Rock record reconstruction of channelized systems through reverse migration simulation conditioned to seismic stratal slices[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 93-94.
- [14] Leary K C P, Buscombe D, Schmeckle M W, et al. Assessing the importance of cross-stream transport in bedload flux estimates from migrating dunes; Colorado river, Grand Canyon National Park [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 79.
- [15] Spector J J, Johnson J P L. Feedbacks between dissolution, abrasion, and bed roughness; a flume investigation of carbonate bedrock incision[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 111.
- [16] Kleinhans M G, Haas, de Haas T, Braat L, et al. What sets the size of self-formed estuaries on coastal plains? unravelling biogeomorphological interactions by reconstruction, experiments and models[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 77.
- [17] D'Alpaos A, Finotello A, Canestelli A, et al. Modelling tidal meander morphodynamics[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 47.
- [18] Choi K S, Jo J H, Kim D H. Tide-modulated fluvial sedimentation in a highly sinuous channel near the dry-season tidal limit of Sit-taung River, Myanmar[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 42.
- [19] Gugliotta M, Saito Y, Nguyen V L, et al. Facies and sedimentary processes along the fluvial to marine transition zone of the mixed-energy Mekong River delta, Vietnam[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 63.
- [20] Plink-Björklund P, Genecov M. Morphodynamics of fluvial-tidal transition zone in tide-dominated deltas; a review[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 97.
- [21] Prokocki E W, Best J L, Ashworth P J, et al. The alluvial architecture of bars across the fluvio-tidal transition; Lower Columbia River, OR/WA, USA[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 98-99.
- [22] Ghinassi M, Oms O, Fondevilla V, et al. Inferring tidal origin of point bar deposits; examples from the Cretaceous Tremp formation (South-Central Pyrenees, Spain)[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 60-61.
- [23] Ronchi L, Fontana A, Cohen K M. The interplay of fluvial and marine processes as recorded in the post-LGM incised valleys of Tagliamento and Piave rivers (NE Italy) [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 102.
- [24] Best J L, Vardy M E, Bull J M, et al. Downstream changes in scour morphology and depths within the Ganges-Brahmaputra-Meghna fluvio-deltaic network[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 29.
- [25] Hale R P, Goodbred S L, Wilson C A, et al. Seasonally variable controls on sedimentation in a mesotidal megadelta[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 67.
- [26] Wilson C A, Sincavage R S, Goodbred S L. Coupling mass extraction of sediment, topography, and backwater effects in the Ganges-Brahmaputra delta[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 125-126.
- [27] Howe T, Holbrook J. The default delta is not a delta[C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 71-72.
- [28] Smith V, Hosseiny H. Modeling geomorphic changes in the backwater through flood inundation maps in a two-dimensional hydrody-

- dynamic model coupled with sediment transport; a case study of Darby Creek, PA [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 110.
- [29] Overeem I, Lintern G. Redefining thresholds of river sediment concentrations and the triggering of turbidity currents [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 92.
- [30] Carling P A, Leclair S F. Dryland fluvial sedimentology from the modern Luni River, Thar Desert, Western India [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 39.
- [31] Bordy E M, Paiva F. Megafan dynamics at the end-Capitanian in the main Karoo Basin, South Africa [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 34-35.
- [32] Santos M G M, Hartley A J, Mountney N P, et al. Meandering rivers in modern desert basins: implications for the pre-vegetation fluvial rock record [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 105.
- [33] Cohen T J, Jansen J D, Gliganic L A, et al. Fluvio-lacustrine interactions in Australia's arid inland drainage system [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 44.
- [34] Gao Z Y, Zhou C M, Shi Y X, et al. Characteristics and distribution of the gravel from modern river and fan sedimentary system of Yanqi Basin in Xinjiang, China [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 58-59.
- [35] Davies N S, McMahon W J, Shillito A P. Searching for alluvial sedimentary-stratigraphic signatures of life: how and why vegetation influences are most readily identified [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 49.
- [36] Noad J J. Braided River deposits of the Archean Witwatersrand group, focusing on exposures in St. Helena Gold Mine, Welkom, Free State, South Africa [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 90.
- [37] Long D G F. Gold bearing conglomerates in the early Paleoproterozoic Mississagi formation of northern Ontario: an example of valley-confined gravel bed rivers, influenced by hyper-concentrated flows [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 81.
- [38] Blum M, Pettit B, Tenpenny T. Detrital zircons as a next-generation tool in source-to-sink sedimentological and stratigraphic analysis [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 33-34.
- [39] Hartley A J, Owen A, Swan A, et al. Braided or meandering: Are fluvial facies models useful? [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 68-69.
- [40] Blum M. Types of rivers preserved in the stratigraphic record [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 32-33.
- [41] Owen A, Ebinghaus A, Hartley A J, et al. A basin scale model of the Bighorn Basin and its implication for predicting facies distribution within continental sedimentary successions [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 93.
- [42] Coderre A B, Durkin P R, Hubbard S M, et al. Confined meander-belt deposits of the cretaceous grand rapids formation, Alberta, Canada [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 136-137.
- [43] Durkin P R, Hubbard S M, Holbrook J, et al. Quantifying preservation of fluvial meander-belt deposits; Documenting the "survivalability" curve [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 141.
- [44] Montero J M, Colomera L, Yan N, et al. Fluvial meander-belt reservoir modelling using multi-point statistics conditioned on analogue-based forward stratigraphic models [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 155.
- [45] Morón S, Salles T, Gallagher S, et al. Linking fluvio-deltaic and lithospheric processes; The interaction between sediment load and flexural isostasy on creating accommodation and its effect on delta architecture [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 156-157.
- [46] Owen A, Ebinghaus A, Hartley A J, et al. A sandstone body classification scheme of fluvial deposits from the Bighorn Basin and its wider application [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 157-158.
- [47] Sarti G, Amorosi A, Rossi V, et al. The role of late quaternary in-

- cised valley systems in coastal-plain aquifer geometry: a case study from the Arno Plain (Ligurian Sea, Italy) [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 161-162.
- [48] Shiers M N, Mountney N P, Hodgson D M., et al. Controls on the internal and external architecture of fluvial and marine influenced point-bar elements from a coastal plain setting [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 107-108.
- [49] Swan A, Hartley A, Owen A, et al. Analysis of a 3D sandy point-bar: Implications for fluvial facies analysis [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 112.
- [50] Yan N, Mountney N P, Colomera L, et al. A forward stratigraphic model of fluvial meander evolution, point-bar facies architecture and heterogeneity: Subsurface applications [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 127.
- [51] van de Lageweg W I, van Dijk W M, Box D, et al. Archimetrics: a quantitative tool to predict three-dimensional meander belt sand-body heterogeneity [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 119.
- [52] Kleinmans M G, de Vries B, van Oorschot M, et al. Effects of muddy vegetated floodplain formation on river pattern [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 78-79.
- [53] Colomera L, Arévalo O J, Mountney N P. Depositional and erosional record of extreme global warming: the Paleocene-Eocene thermal maximum in the Tresp Group (Pyrenees, Spain) [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 138.
- [54] Ashley T, McElroy B, Buscombe D, et al. Modeling bedload flux at sediment monitoring stations on supply-limited, sand-bed rivers [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 129.
- [55] Slowik M, Dezsö J, Marciniak A, et al. The formation of alluvial islands in a river course transformed by channel straightening and dam closures [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 109-110.
- [56] Candel J H J, Kleinmans M G, Makaske B, et al. Meander initiation of a laterally stable river during the late Holocene [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 135.
- [57] Smith G H S, Kazemifar F, Blois G, et al. Effects of biofilm on flow over and through a permeable bed [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on Fluvial Sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 161.
- [58] McMahon W J, Davies N S, Went D J. Negligible microbial mat-ground influence on pre-vegetation river functioning [C]//Hubbard S M, Durkin P R, Leckie D A, et al. Proceedings of the 11th International Conference on fluvial sedimentology. Calgary, Canada: University of Calgary, 2017: 85.
- [59] 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.]

Current Hot Topics and Advances of Fluvial Sedimentology: A summary from 11th international conference on fluvial sedimentology

GAO ZhiYong^{1,2}, SHI YuXin^{1,2}, MAO ZhiGuo^{1,2}, FENG JiaRui^{1,2}, CUI JingGang^{1,2}

1. Petroleum Geology Research and Laboratory Center RIPED, Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Enhanced Oil Recovery (Research Institute of Petroleum Exploration and Development), Beijing 100083, China

Abstract: The 11th international conference on fluvial sedimentology was held in University of Calgary, Canada, from 17 to 21 July 2017. As a pageant of international fluvial sedimentology, once four years, scholars who came from North America, European, Australia and Asia attended the conference. A series of academic topics were presented and discussed in different technical programs. More reports and sessions focus the following fields: 1) River dynamics and change, including linking modern river processes to the ancient record, beyond overbank-complex dynamics of channel-floodplain systems, perspectives on river dynamics and change, and reconstructing river channel migration: Next generation forensics for plane evolution patterns, and turbulence, grain interactions, and sedimentation in alluvial and bedrock rivers. 2) Rivers on the edge, including where the river meets the sea: morphodynamics and sedimentology in systems with combined fluvial and tidal currents, transitions in flow, morphology and stratigraphy along river-fed margins, and dryland fluvial and alluvial systems, fluvial-aeolian interaction, and pre-vegetation, non-vegetated, or 'normal' rivers, processes and deposits. 3) Fluvial stratigraphy and subsurface resources, from source to sink sedimentological and stratigraphic analysis, braided or meandering are fluvial facies models useful, and types of rivers preserved in the stratigraphic record. 4) Managing fluvial landscapes, including the climate changing, mud and vegetation of floodplain influence on the discharge and models of fluvial, and the evolution of alluvial island and meandering channel, and the role of biostabilized sediments in fluvial environments. Based on the data of 11th International Conference on fluvial sedimentology, we considered the quantitative research of evolution progress of fluvial, the physical simulation and numerical simulation of fluvial sedimentology, reconstructing the point bar and calculate the date of facies model, and using the detrital zircons as a next dating tool in source to sink sedimentological and stratigraphic analysis, in which some will still be important research and development fields of international fluvial sedimentology.

Key words: fluvial sedimentology; hot topics; research direction; international conference on fluvial sedimentology