

文章编号: 1671-1505(2025)04-0965-20 DOI: 10.7605/gdxb.2025.061

砾石质曲流河探地雷达相刻画及沉积模式研究*

韩海波^{1,2} 姚宗全^{1,2} 王 威^{1,3} 德勒恰提·加娜塔依^{1,2}
谢宗瑞⁴ 汪 勇⁵ 杨 帆⁶ 赵文硕^{1,2}

1 新疆大学地质与矿业工程学院, 新疆乌鲁木齐 830047

2 新疆中亚造山带大陆动力学与成矿预测自治区重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830047

3 新疆维吾尔自治区人民政府国家 305 项目办公室, 新疆乌鲁木齐 830000

4 中国石油新疆油田公司勘探开发研究院, 新疆克拉玛依 834000

5 中国石化胜利油田西部油气勘探项目部, 山东东营 257015

6 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 曲流河砂体横向变化快, 砂体内部构型具有复杂性和多变性。利用探地雷达 (GPR), 以平—剖结合的思路对新疆呼图壁河与额尔齐斯河砾石质曲流河段进行沉积模式研究, 并综合现代沉积、无人机与遥感影像对 GPR 剖面进行解释。识别出 4 种 GPR 相: 连续的亚平行低—中振幅反射、连续的顶平底凸型低—中振幅反射、连续倾斜中—高振幅反射以及不连续倾斜高振幅反射, 分别对应河漫滩、废弃河道、点坝和滞留沉积 4 种沉积微相。通过总结砾石质曲流河垂向与横向沉积特征演变及交互作用, 建立了多期次沉积模式, 并构建了三维地质模型, 为后期曲流河储集层预测及建模提供了精细构型组合规律和定量地质信息。

关键词 曲流河 探地雷达 沉积微相 沉积模式 呼图壁河 额尔齐斯河 新疆

第一作者简介 韩海波, 男, 2000 年生, 硕士研究生, 主要从事探地雷达、沉积储集层及石油地质研究。
E-mail: hhb2924358818@163.com。

通讯作者简介 姚宗全, 男, 1989 年生, 博士, 副教授, 主要从事石油地质、沉积储集层及油气储集层表征与建模研究。E-mail: yzq@xju.edu.cn。

中图分类号: P319.2 文献标志码: A

Ground penetrating radar facies characterization and sedimentary model study of gravelly meandering river

HAN Haibo^{1,2} YAO Zongquan^{1,2} WANG Wei^{1,3} DELEQIATI · Jianatayi^{1,2}
XIE Zongrui⁴ WANG Yong⁵ YANG Fan⁶ ZHAO Wenshuo^{1,2}

1 School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Ürümqi 830047, China

2 Key laboratory of Central Asian Orogenic Belts and Continental Dynamics, Ürümqi 830047, China

3 National 305 Project Office of the People's Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830000, China

4 Petroleum Exploration and Development Research Institute, PetroChina Xinjiang Oilfield Company, Xinjiang Karamay 834000, China

5 Project Department of Western Oil and Gas Exploration, Sinopec Shengli Oilfield Company, Shandong Dongying 257015, China

6 Research Institute of Petroleum Exploration and Development, PetroChina, Beijing 100083, China

* 国家自然科学基金(编号: 41902109)和新疆维吾尔自治区天山英才项目(编号: 2023TSYCCX0002)联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41902109), Tianshan Talent Project of Xinjiang Uygur Autonomous Region (No. 2023TSYCCX0002)]

收稿日期: 2024-12-26 改回日期: 2025-02-14

Abstract The meandering river sand bodies exhibit rapid lateral variability and feature complex and heterogeneous internal architectures. In this study, ground-penetrating radar (GPR) was employed in conjunction with a combined plan-view and cross-sectional approach to investigate sedimentary patterns in gravel-dominated meandering river segments of the Hutubi and Irtysh Rivers in Xinjiang. Interpretations of GPR profiles were supported by modern sedimentological observations, UAV imagery, and remote sensing data. Four distinct GPR facies were identified: (1) continuous subparallel low-to-medium amplitude reflections corresponding to floodplain deposits; (2) continuous flat-topped to convex-based low-to-medium amplitude reflections indicative of abandoned channels; (3) continuous inclined medium-to-high amplitude reflections characteristic of point bars; and (4) discontinuous inclined high-amplitude reflections associated with lag deposits. Through an integrated analysis of the vertical and lateral sedimentary evolution and their interactions in gravel-bed meandering systems, a multi-phase depositional model was developed. This model supports the construction of a three-dimensional geological framework, providing refined architectural configurations and quantitative geological information that offer valuable guidance for reservoir prediction and modeling in meandering fluvial systems.

Key words gravelly meandering river, GPR (ground penetrating radar), sedimentary microfacies, sedimentary model, Hutubi River, Irtysh River, Xinjiang

About the first author HAN Haibo, born in 2000, is a master graduate student. He is mainly engaged in researches on ground penetrating radar, sedimentary reservoir and petroleum geology. E-mail: hhb2924358818@163.com.

About the corresponding author YAO Zongquan, born in 1989, Ph.D., is an associate professor. He is mainly engaged in researches on petroleum geology, sedimentary reservoirs and gas reservoir characterization and modeling. E-mail: yzq@xju.edu.cn.

1 概述

中国油气资源以陆相碎屑岩储集层为主, 河流相储集层占比高, 如渤海湾盆地、松辽盆地、塔里木盆地和四川盆地等均发现了大量河流相油气储集层 (胡光义等, 2014; 岳大力等, 2018; 李胜利等, 2022), 占总开发储量的 42.6% (岳大力等, 2007), 具有重要经济价值与战略意义。

由于河流持续性迁移和频繁改道, 沉积物的外部形态和内部结构不断变化, 导致曲流河沉积结构复杂化 (黄建廷等, 2022)。尽管前人采用各种手段进行研究, 但曲流河内部沉积微相空间变化和叠迁样式刻画仍不够精细。露头观察仅能获取出露地表的较小范围信息, 且部分地区露头风化剥蚀或变形严重 (徐琪等, 2023); 测井与岩心数据虽可得到较为连续的垂向地层信息, 但其横向连续性差, 大井距的井间推测性大 (Ni *et al.*, 2023); 地震资料可获得连续的横向地层信息, 但成像品质差、精度低, 难以准确表征精细地层信息, 存在多解性 (张宪国等, 2022); 水槽沉积模拟实验为河道迁移

演化提供了依据 (Bathurst *et al.*, 2002; Nelson and Morgan, 2018), 但由于规模较小且源-汇体系不完整, 难以全面总结其规律 (Lunt *et al.*, 2004)。

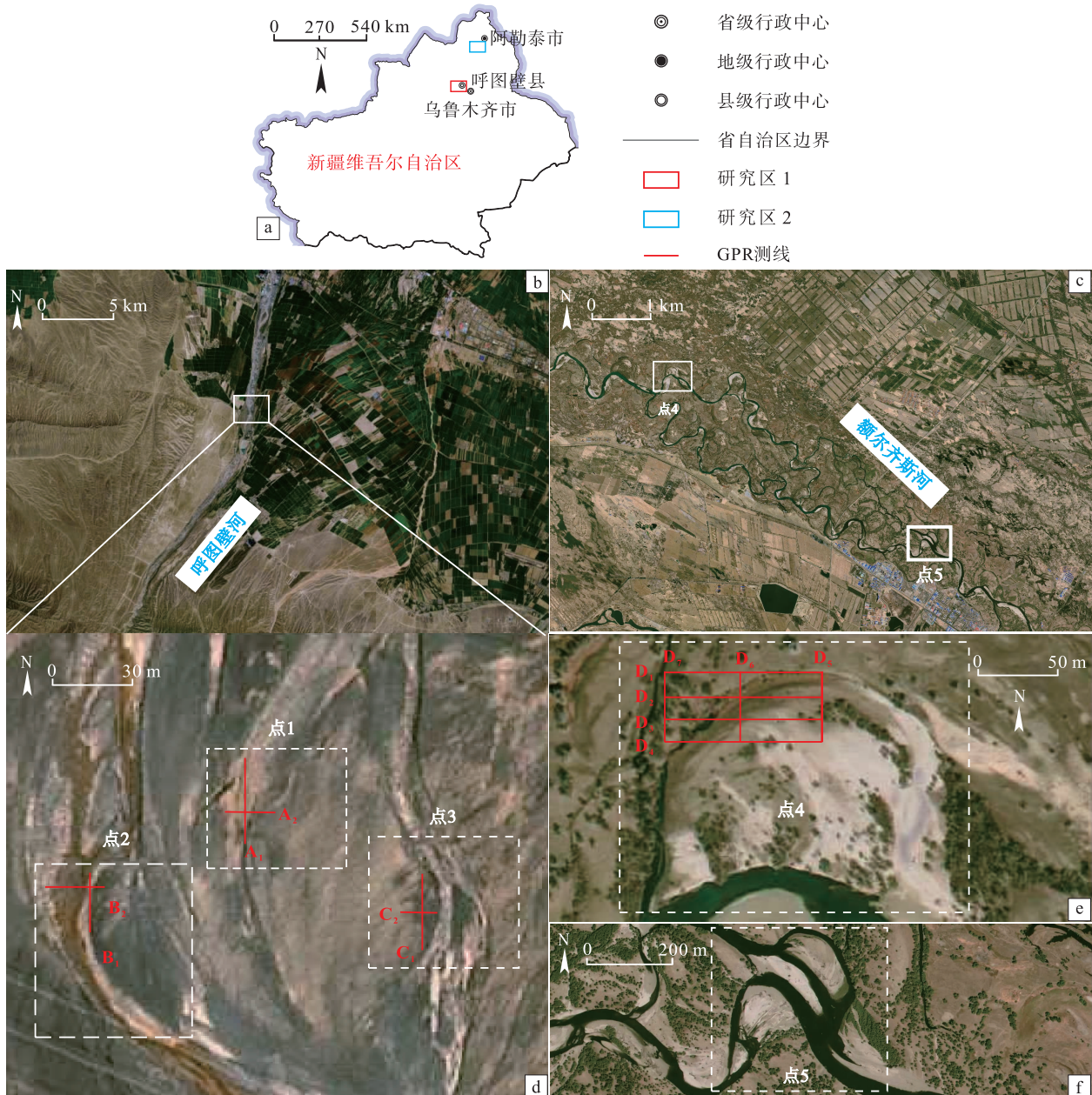
探地雷达 (GPR) 具有分辨率高、无损探测且连续成像的优势, 最大程度拓展了横向探测信息连续性 (Gizzi and Leucci, 2018)。其纵向分辨率可以达到 10 cm, 解决了传统地震资料分辨率不足的问题, 对于描述和解释沉积环境至关重要 (Guo *et al.*, 2022), 同时也克服了岩心和测井资料横向不连续的局限。目前, GPR 技术已经广泛应用于工程测试 (Hugenschmidt, 2000; Lahouar and Al-Qadi, 2008)、考古 (Himi *et al.*, 2016; Malagodi *et al.*, 1996)、地球物理勘探 (Hickin *et al.*, 2009; Beauprêtre *et al.*, 2013) 等浅部探测领域, 充分体现了其在描述不同介质环境结构方面的巨大潜力。20 世纪末 GPR 首次应用于曲流河沉积构型研究, 获得了高分辨率剖面 (Bridge *et al.*, 1995)。在曲流河和辫状河的研究中, 总结了河漫滩和点坝的 GPR 相特征并分析了在不同沉积环境下的差异

(Vandenberghe and Overmeeren, 1999; Kostic and Aigner, 2007), 但研究规模大, 精度较低, 尚未完全阐明其形成机制。GPR 已被用于解释河床沉积物的非均质性和结构特征 (Dara *et al.*, 2019), 但其复杂性和设备精度问题都制约了对其发育机理和几何形态的研究。

以平一剖对应为主线, 结合 GPR、现代沉积

调查、无人机与遥感影像对新疆呼图壁河和额尔齐斯河砾石质曲流河段沉积物 (河漫滩、废弃河道、点坝、滞留沉积) 进行了详细的沉积学特征研究 (图 1), 总结以点坝发育为核心的沉积模式, 构建砾石质曲流河地质模型, 为砾石质曲流河储集层的表征和预测提供知识库。

呼图壁河位于天山中段北麓、准噶尔盆地南缘



a—新疆呼图壁河与额尔齐斯河位于中国新疆地区西北部 (涉及国界审图号: GS (2016) 1600 号); b—研究区 1 位于呼图壁河的中上游段, 布置 3 个探测点; c—研究区 2 位于额尔齐斯河的中上游段, 布置 1 个探测点和 1 个沉积演化观测点; d—呼图壁河探测点 1、探测点 2、探测点 3 遥感影像与 GPR 测线布置; e—额尔齐斯河探测点 4 遥感影像与 GPR 测线布置; f—额尔齐斯河沉积演化观测点遥感影像

图 1 新疆呼图壁河与额尔齐斯河地理位置及资料点分布

Fig. 1 Geographical location and data distribution of Hutubi River and Irtysh River in Xinjiang

($86^{\circ}05' \sim 87^{\circ}08' E$), 全长 258 km, 流域面积 $10\,255\text{ km}^2$ (耿峻岭等, 2005)。额尔齐斯河位于阿尔泰山脉南麓 ($85^{\circ}51' \sim 91^{\circ}06' E$), 中国境内延伸 633 km, 流域面积为 $57\,000\text{ km}^2$ (努尔兰·哈再孜, 2022) (图 1-a)。本次研究的 GPR 探测点、无人机、现代沉积信息获取位置分别位于新疆维吾尔自治区呼图壁县 147 县道龙王庙附近 ($86^{\circ}48'42.56''$, $44^{\circ}3'34.50''$) (图 1-b, 1-d) 和阿勒泰市西南角 ($87^{\circ}46'31.22''$, $47^{\circ}23'42.78''$) (图 1-c, 1-d, 1-e, 1-f)。

2 方法

2.1 GPR 剖面采集

GPR 技术是一种利用高频电磁波来确定介质内部物质分布规律的地球物理方法,其反射波差异由介电常数差异引起,而介电常数变化与沉积物类型、纹理结构、成分和内部孔隙数量有关 (Van and Schlager, 2000; Kowalsky *et al.*, 2001)。

本次数据采集使用意大利 IDS 公司生产的 RIS-K2 探地雷达,共设计 4 个探测区 (图 1-d, 1-e)。初步在点 1 上进行了 200 MHz、400 MHz 这 2 种不同频率测试,由于高频电磁波的波速和衰减受地下介质的介电常数影响,近地表环境中含水地层会加速 GPR 信号的衰减 (谭绍泉等, 2003)。400 MHz 成像效果较差,对沉积构造的反映辨识度有限。因此,综

合考虑纵向探测深度和分辨率,最终选择 200 MHz 天线频率。采集时窗为 128 ns,每扫采样点数为 512 个,通过直径 50 cm 的测量轮记录剖面长度。

通过人工拖行方式进行数据采集,以大约 1 m/s 步行速度平稳拖拽,以减少仪器跳动,确保图像清晰准确。测量轮记录仪器拖拽过程中的距离变化,以确定每条测线的长度 (表 1)。

2.2 GPR 数据处理

GPR 数据处理的目的是压制由地表天气、地下介质与仪器拖拽震动等因素产生的噪声,增强有效信号,提高资料信噪比,以便从数据中提取振幅、频率、相位等特征信息,帮助后期能够准确顺利开展地质解释 (Gu *et al.*, 2019)。

本次数据处理采用意大利 IDS 公司研发的 GRED 软件。首先进行数据的预处理,包括数据合并、剔除无效数据以及统一剖面方向。随后进行剖面数据的信号增强和噪声抑制处理,包括:零点漂移 (去除首波)、背景去噪、水平与直带通滤波处理以及线性和平滑增益。

3 结果

3.1 GPR 相

GPR 相类似于地震相,通过一系列属性定义 (Roksandić, 1978; Sangree and Widmier, 1979), 包括

表 1 新疆呼图壁河与额尔齐斯河 GPR 测线信息

Table 1 GPR profile survey line information of Hutubi River and Irtysh River in Xinjiang

GPR 剖面	起点坐标		终点坐标		长度/m
	北纬	东经	北纬	东经	
剖面 A ₁	$44^{\circ}3'35.46''$	$86^{\circ}48'46.71''$	$44^{\circ}3'34.48''$	$86^{\circ}48'46.72''$	30
剖面 A ₂	$44^{\circ}3'34.88''$	$86^{\circ}48'46.92''$	$44^{\circ}3'34.88''$	$86^{\circ}48'46.32''$	12
剖面 B ₁	$44^{\circ}3'35.47''$	$86^{\circ}48'40.90''$	$44^{\circ}3'35.47''$	$86^{\circ}48'41.88''$	20
剖面 B ₂	$44^{\circ}3'35.94''$	$86^{\circ}48'41.79''$	$44^{\circ}3'35.35''$	$86^{\circ}48'41.79''$	18
剖面 C ₁	$44^{\circ}3'33.88''$	$86^{\circ}48'38.42''$	$44^{\circ}3'32.52''$	$86^{\circ}48'38.41''$	40
剖面 C ₂	$44^{\circ}3'33.41''$	$86^{\circ}48'38.09''$	$44^{\circ}3'33.41''$	$86^{\circ}48'38.68''$	13
剖面 D ₁	$47^{\circ}26'31.84''$	$87^{\circ}40'18.00''$	$47^{\circ}26'31.84''$	$87^{\circ}40'10.60''$	154
剖面 D ₂	$47^{\circ}26'30.99''$	$87^{\circ}40'18.00''$	$47^{\circ}26'31.00''$	$87^{\circ}40'10.60''$	154
剖面 D ₃	$47^{\circ}26'30.16''$	$87^{\circ}40'18.00''$	$47^{\circ}26'30.14''$	$87^{\circ}40'10.60''$	154
剖面 D ₄	$47^{\circ}26'29.29''$	$87^{\circ}40'18.00''$	$47^{\circ}26'29.29''$	$87^{\circ}40'10.60''$	154
剖面 D ₅	$47^{\circ}26'31.84''$	$87^{\circ}40'18.00''$	$47^{\circ}26'29.29''$	$87^{\circ}40'18.00''$	79
剖面 D ₆	$47^{\circ}26'31.84''$	$87^{\circ}40'15.04''$	$47^{\circ}26'29.29''$	$87^{\circ}40'15.02''$	79
剖面 D ₇	$47^{\circ}26'31.84''$	$87^{\circ}40'10.60''$	$47^{\circ}26'29.29''$	$87^{\circ}40'10.60''$	79

反射幅度、连续性、几何形状、主导频率和穿透程度等(Shan *et al.*, 2015)。利用雷达地层学的目的是识别特征 GPR 相,并将其与特定的沉积环境相关联,进而通过 GPR 研究重建沉积环境(Vandenberghe and Overmeeren, 1999)。GPR 相与沉积微相之间的识别需多要素约束,例如反射线的形状、倾角、空间位置和连续性等组合关系(Neal, 2004),确保 GPR 相与沉积微相形成良好的对应关系。

GPR 成像解译中大多数界面和沉积层序与沉积物供应和可容纳空间的变化有关,这些变化与周期性、高频季节性事件(如洪水)或河流过程(如点坝迁移)有关,从而形成了典型的 GPR 反射结构。

本次研究共识别出 4 种 GPR 相,即 GPR 相 I、GPR 相 II、GPR 相 III 和 GPR 相 IV,分别对应 4 种沉积微相:河漫滩、废弃河道、点坝、滞留沉积(图 2)。

3.1.1 GPR 相 I

在 GPR 剖面上整体呈现较为连续的亚平行低—中振幅反射,反射波组平行组合,偶见轻微波动,同相轴连续,厚度为 0.5~0.8 m(图 2-a)。现代沉积剖面中该相主要发育深灰色细粒岩、中砾岩包含泥砂杂基,磨圆分选较好。可见小型波状层理、水平纹层、生物活动痕迹及植物根系,发育在曲流河沉积体系最上部(图 2-b)。露头以褐红色至砖红色泥岩和粉砂质泥岩为主,夹薄层状粉砂岩与粉细砂岩,发育平行层理或水平层理,渗透性较低(图 2-c)。平面上呈板状,可见粒度变化(图 2-d, 2-q)。

这种 GPR 相特征形成主要与地下介质较为单一、密实性强有关(Rucsandra *et al.*, 2001)。垂向上呈现不明显向上变细的趋势,反映了水动力条件较弱且沉积环境稳定的特征,综合分析 GPR 相 I 为河漫滩(Wooldridge and Hickin, 2005; Yue *et al.*, 2019)。

3.1.2 GPR 相 II

在 GPR 剖面上整体呈现低振幅反射,近似顶平底凸的反射波组,内部较为连续,厚度为 0.5~1 m,底部出现不连续高振幅反射(图 2-e)。现代沉积中,此相呈正粒序结构,主要由深灰色细粒岩包含泥砂杂基组成,发育于河漫滩下部,呈不对称透镜状。以细粒沉积为主,含大块砾石,结构成熟度低,多为棱角一次棱角状,颗粒种类多,分选性差(图 2-f)。露头呈顶平底凸状,以红褐色细砂岩为主,发育平行

层理,渗透性低,底部可见冲刷面。内部砾石分选性与磨圆度较差,多呈次棱角状及次圆状,粒径大小不均,但仍有向上粒度变小的趋势(图 2-g)。

底部不连续高振幅反映了底部沉积有较大的砾石,是阵发性高能洪水的产物。现代沉积和露头均显示正粒序结构,2D 的 GPR 模式中上部反射更为连续(图 2-e),揭示了沉积过程中水动力逐渐减弱和物源减少的沉积特征,综合分析 GPR 相 II 为废弃河道(Vandenberghe and Overmeeren, 1999; Hugenholz *et al.*, 2007)。该废弃河道为“串沟截直”方式形成,这直接影响了沉积序列,沉积序列砂薄泥厚,内部主要发育黏土和细砂沉积,底部发育略粗的中—粗砂。平面上呈狭长带状分布(图 2-q; 图 3-a)。GPR 剖面上可观察到明显的废弃河道细粒沉积物与周围沉积物的分界面(Skelly *et al.*, 2003),呈现顶平底凸型(图 2-h; 图 3-c)。

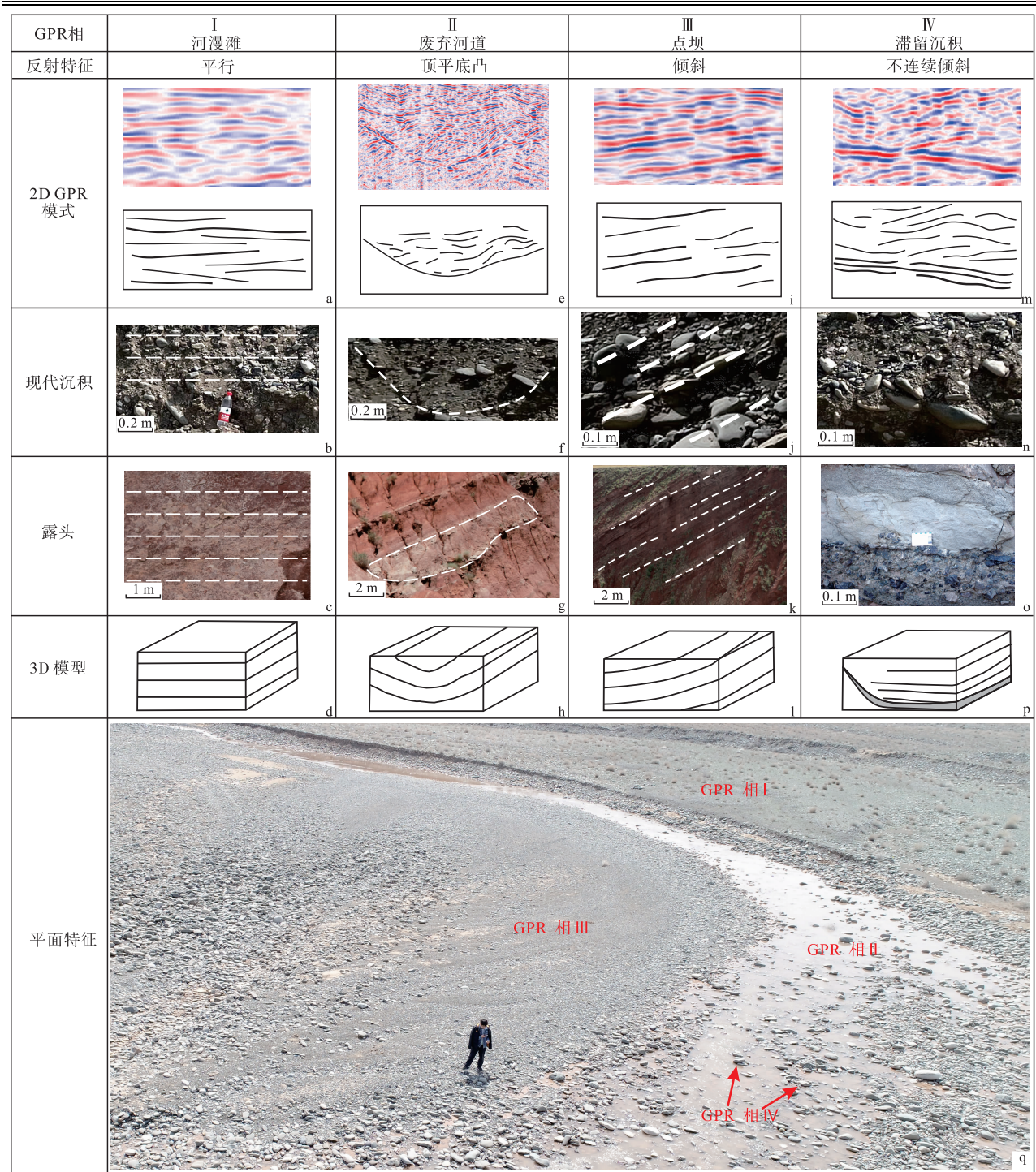
3.1.3 GPR 相 III

在 GPR 剖面上整体呈现倾斜状高振幅反射,内部连续性好,厚度为 1~1.5 m,由多个同方向倾斜的反射构成反射波组(图 2-i),与废弃河道平面上相接。现代沉积中,该相主要发育灰色中粗砾岩包含泥砂杂基,具有向上变细的结构特点,砾石磨圆分选较好。呈叠瓦状披覆于前期砂体之上,表现出多期侧向平行发育的产状特征(图 2-j)。其下倾方向与河流沉积体底界面相交,上倾方向延伸至地表或与更晚期的此类沉积体界面相交。

露头可见由若干侧积体组成,侧积体间发育斜交层理的泥质夹层,发育槽状交错层理和板状交错层理(图 2-k)。剖面上 GPR 相 III 呈现楔状,平面上呈新月形(图 2-l, 2-q),由多个向上逐渐变细的正粒序组成,揭示了水动力条件强弱频繁交替的沉积特征,综合分析 GPR 相 III 为点坝(Yue *et al.*, 2019)。

后期侵蚀出露的点坝上半部分,出露地表 1.5 m,由灰黑色、灰白色砂、砾石组成,砾石呈椭圆状,分选差。内部砾石顺层排列,发育前积纹层和板状交错层理,砾石扁平面倾向上游方向,倾角 30°左右,具叠瓦状构造。前积体内部可见正粒序,反映了减小的洪水流作用(图 4-a, 4-b)。

平面上,点坝可观察到砾石呈向凹岸弧形排列(图 4-c),指示点坝的侧向加积和向下游迁移,最终形成大型侧积纹层(图 4-d)。点坝侧积体图像



a、e、i、m—GPR 相的 2D 模式图；b、f、g、n—对应沉积微相的现代沉积图；c、g、k、o—对应沉积微相的露头（准噶尔盆地南缘侏罗系齐古组）；d、h、l、p—对应沉积微相的 3D 模式图；q—4 种沉积微相的平面图

图 2 呼图壁河与额尔齐斯河砾石质曲流段典型 GPR 相综合解译图

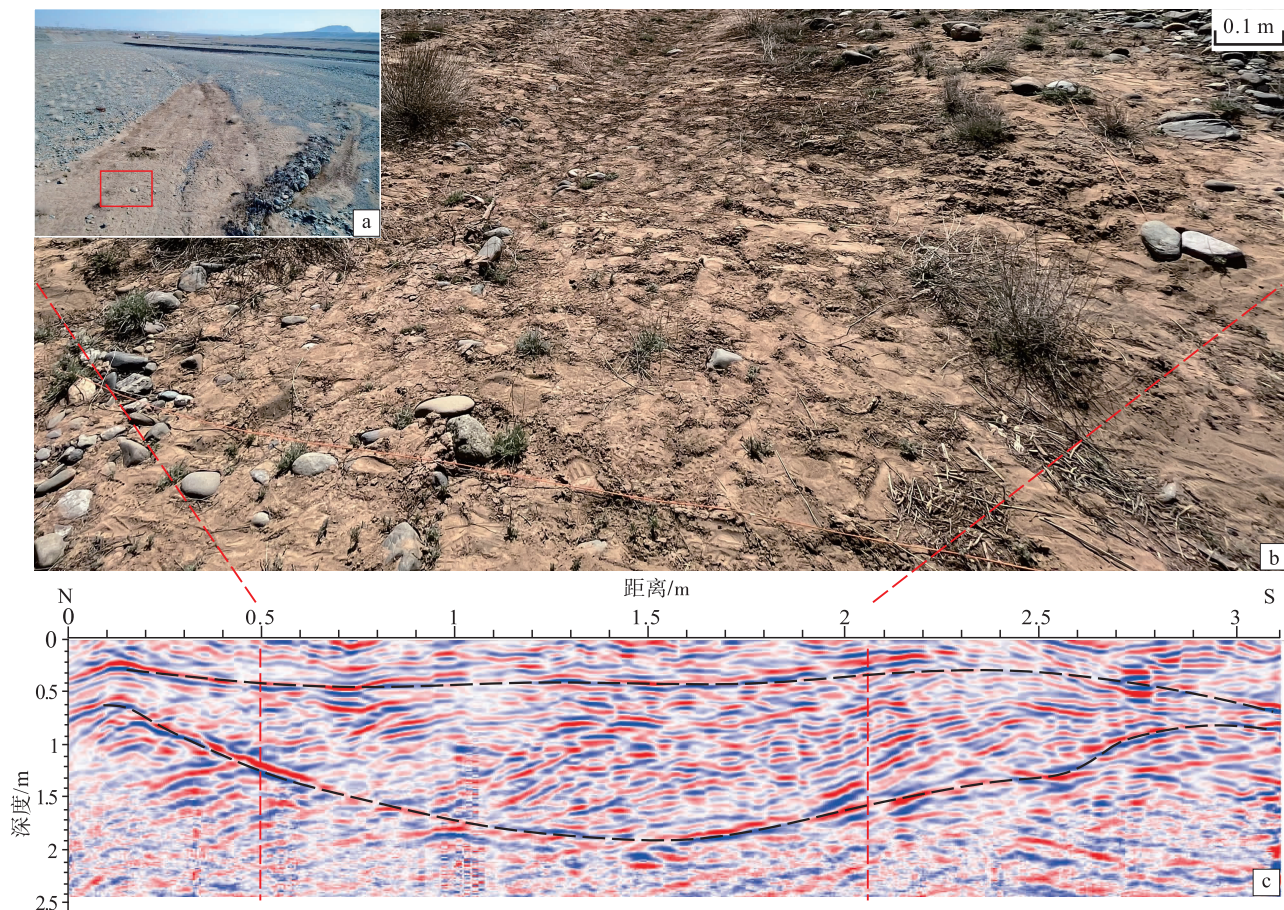
Fig. 2 Comprehensive interpretation of typical GPR facies in gravelly meandering river of Hutubi River and Irtysh River in Xinjiang

可见明显的平面粒度变化(图 4-e)。串沟发育在点坝之上,是洪水高能特征的产物(Hagstrom *et al.*, 2018),在洪水事件时冲掘形成,为辅助过水通道(王家豪等,2018)。顺河道弧形弯曲,现正值枯水

期,故干涸暴露在外。

3.1.4 GPR 相 IV

在 GPR 剖面上整体呈现倾斜状小范围高振幅不连续反射,厚度为 0.2~1 m,振幅普遍高于周围连



a—废弃河道与 GPR 探测位置; b—废弃河道平面特征影像; c—200 MHz 天线测得 GPR 剖面

图 3 呼图壁河“串沟截直”式废弃河道

Fig. 3 Abandoned channel formed by "chute cutoff" of Hutubi River

续反射波,具有突变性。GPR 相 IV 通常在废弃河道、点坝底部(图 2-m)。现代沉积中,此相位于曲流河沉积体系的最底部,砾石粒径大多为 0.1~0.5 m,形态多样,分选和磨圆较差。大多无沉积构造,偶见叠瓦状定向排列,砾石扁平面倾向河流下游方向,长轴垂直于河流流向(图 2-n;图 4-c)。露头上发育在河道底部,粒度明显大于河道内部沉积物,发育冲刷面(图 2-o)。平面上,堆积成不连续的小范围片状、厚度不均(图 2-p,2-q;图 4-c),综合分析 GPR 相 IV 为滞留沉积(Zuk, 2011; Korus *et al.*, 2020)。

3.2 GPR 剖面特征

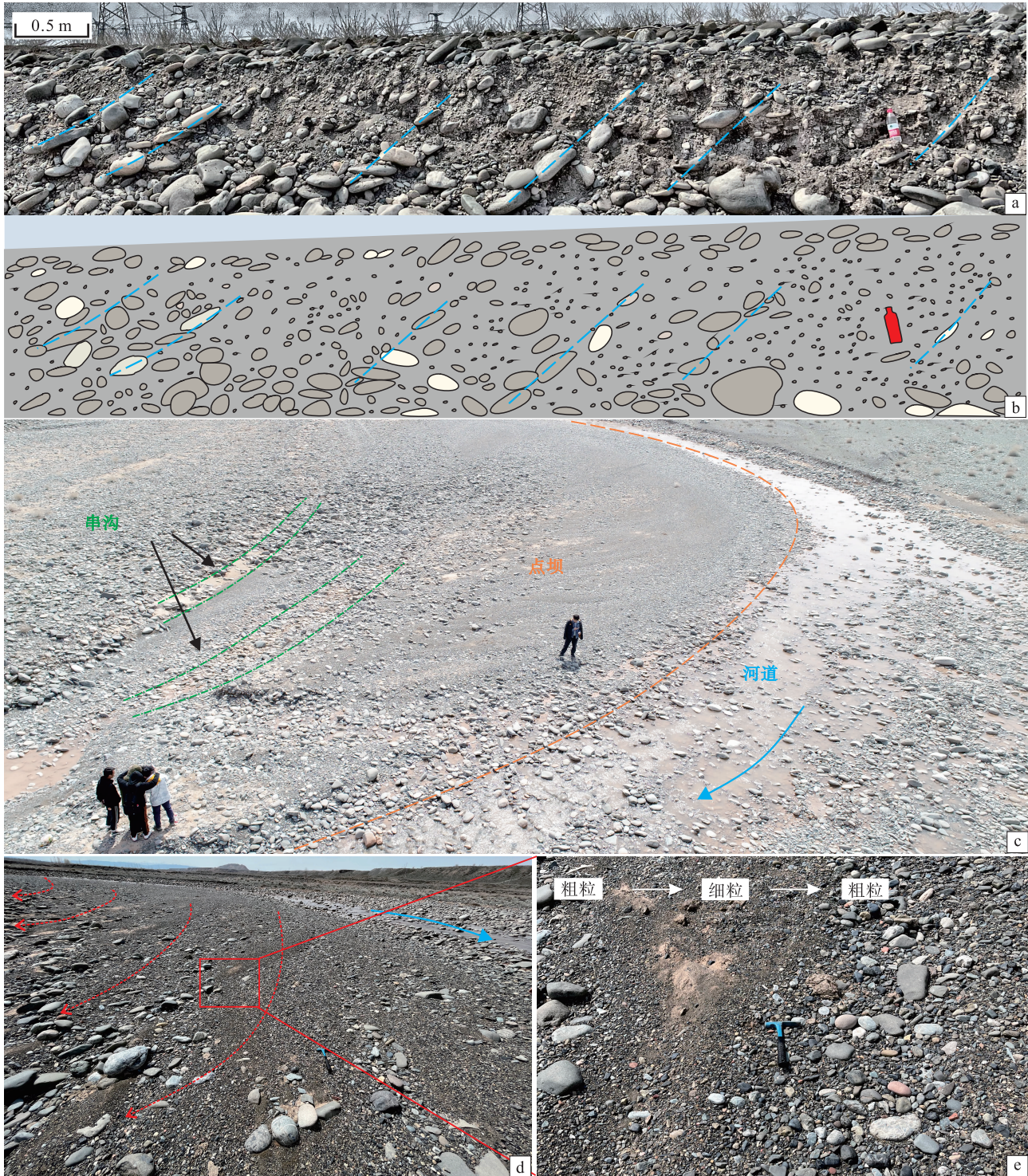
3.2.1 点 1

在点 1 上选取特征性 GPR 剖面 A₁(长度 31 m)与 A₂(长度 12 m),分别沿南北、东西 2 个方向采集,2.5 m 以下反射杂乱已无法有效识别出沉积

构造,有效探测深度 2.5 m(图 5)。

GPR 剖面 A₁ 和 A₂ 顶部的河漫滩(GPR 相 I)整体呈现低振幅反射,反射波组较为连续,少见大规模杂乱反射,厚度 0.5 m,向外侧延伸。反射特征反映此沉积微相岩性相对均匀,水动力条件相对较弱,沉积环境稳定(Dara *et al.*, 2019)。在河漫滩上方识别出 2 个小型顶平底凸的反射结构,内部连续反射,厚度为 0.2~0.3 m,解释为串沟(图 5-a)。在无人机影像上可见 2 条平行于河道的串沟,底部细粒沉积,上部覆盖有 1 层厚度不均的粗砂和细砾,为短暂高能洪水带来的(Srisunthon and Choowong, 2019)(图 5-b)。

在 GPR 剖面 A₁ 和 A₂ 中部的废弃河道(GPR 相 II),叠置在河漫滩下方,反射波组整体呈顶平底凸且内部平行,上部较下部更为连续,与周围沉积物有明显的反射界面,厚度约为 1 m(图 5-b)。GPR 反射特征揭示出沉积过程中水动力逐渐减弱的特

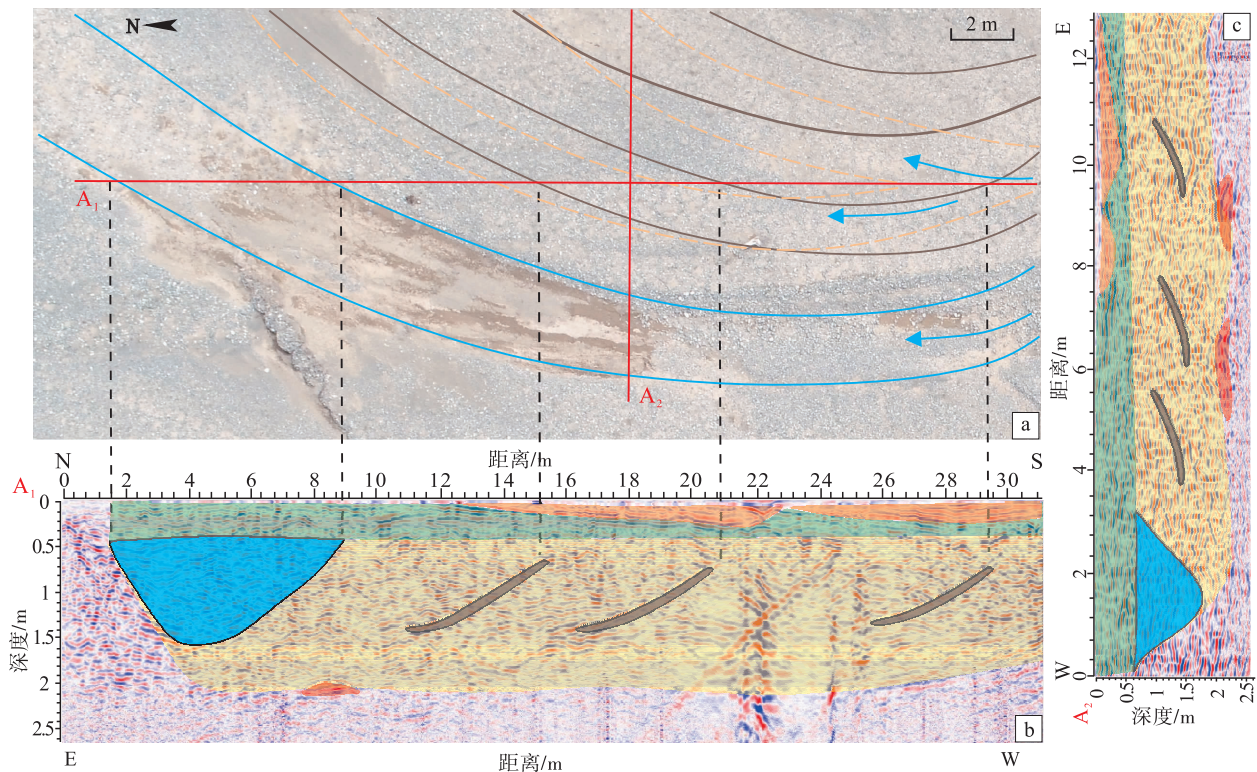


a—点坝剖面影像；b—点坝示意图；c—沉积微相平面形态；d—点坝平面上的砾石排列显示出侧积层；e—侧积层平面细节
图 4 呼图壁河砾质点坝侧向迁移与平面沉积特征

Fig. 4 Lateral migration and planar sedimentary characteristics of gravel point bar in Hutubi River

征,上部沉积物更细粒且均质(Yue *et al.*, 2019)。废弃河道与周围的沉积物粒度有差别,相比上部的河漫滩粒度更大。

点坝(GPR 相Ⅲ)与废弃河道相接,叠置在河漫滩下方,反射波组整体呈倾斜状,反射波组连续性好,厚度为1~1.5 m(图 5-b)。GPR 反射特征反映



a—点 1 无人机影像与 GPR 测线布置位置; b—GPR 剖面 A₁ 成像; c—GPR 剖面 A₂ 成像

图 5 呼图壁河探测点 1 无人机影像与 GPR 剖面解释图

Fig. 5 UAV image and GPR profile interpretation of Point 1 in Hutubi River

了此沉积微相的发育过程,洪水事件形成的侧积体呈叠瓦状侧向叠加于前一侧积体之上,组合为一个点坝(马世忠等,2008)。

在点坝内部识别到几组小尺度、不连续、波动的反射,每组由几个不同深度的不连续波形组成,整体呈倾斜特征,在空间上呈现倾斜交替叠置。尽管这些不连续反射振幅变化复杂且范围从中到高,但其振幅通常高于其他较连续区域。对于此沉积物的识别还结合无人机影像,在影像对应位置观察到更深的颜色(图 5-a),沉积物粒度明显也更细。分析是在每次侧积体形成的末期,水动力严重减弱时形成的,解释为低渗透侧积薄夹层(Yue *et al.*, 2019)。

滞留沉积(GPR 相 IV)不规律分布在废弃河道和点坝底部,厚度与长度无规律。此反射特征就是在废弃河道和点坝形成过程中,因河水搬运力有限,粒度较大的砾石滞留在底部,从而在 GPR 剖面上识别到了与周围细粒沉积不同的高振幅反射(Smith *et al.*, 2009)。

3.2.2 点 2

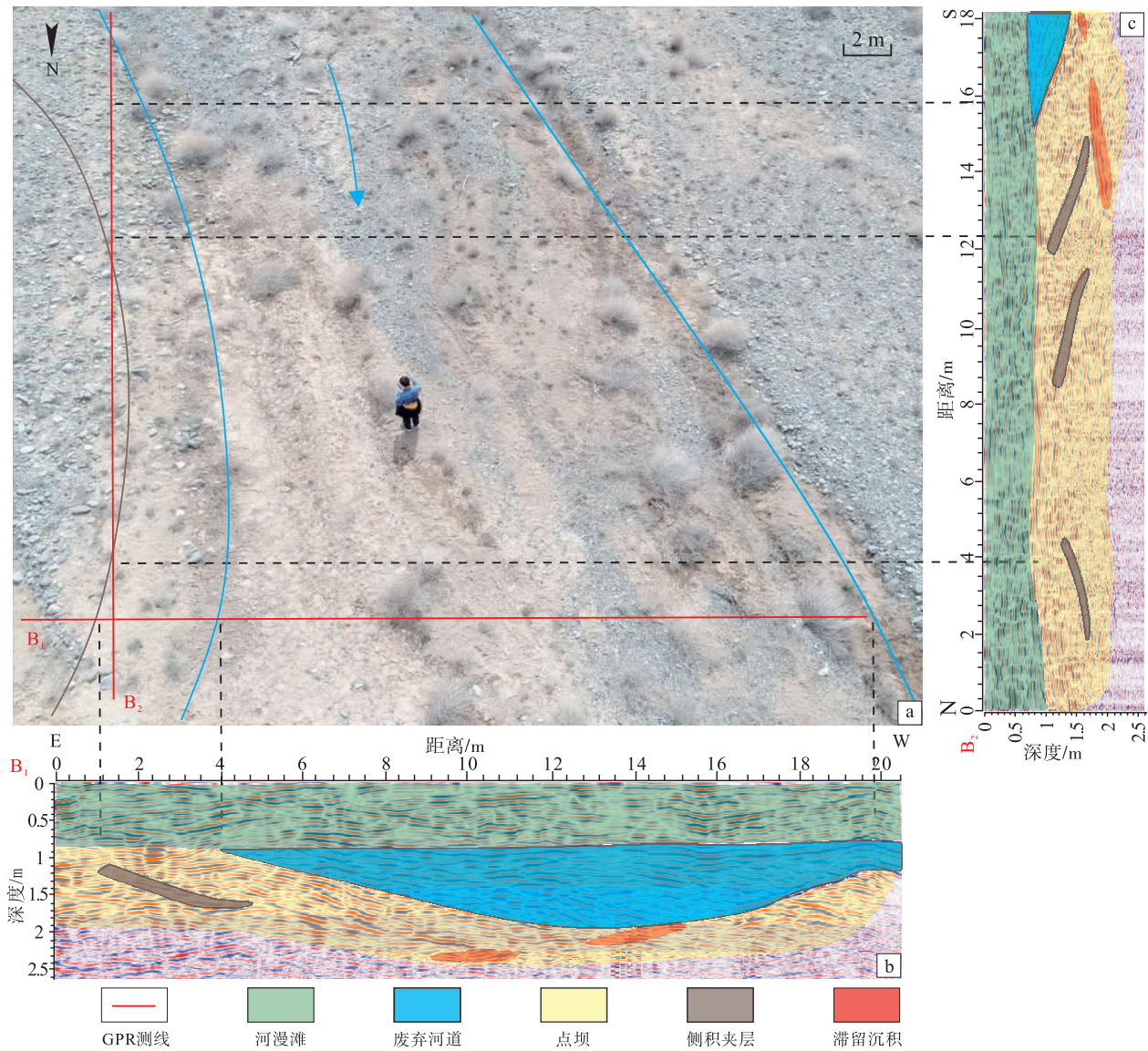
在点 2 上选取典型废弃河道特征性的 GPR 剖

面 B₁(长度 20 m)与 B₂(长度 18 m),分别沿东西、南北方向采集,有效探测深度 2.5 m(图 6)。

点 2 的河漫滩(GPR 相 I)相较于点 1,在 GPR 剖面图像上厚度更大且反射波组更连续,表明点 2 沉积河漫滩时水动力减缓趋势更慢,沉积物更多且均质(图 6-b)。

废弃河道(GPR 相 II)叠置在河漫滩下方,厚度为 0.5~1 m。亚平行连续反射占主要部分,说明废弃河道的形成是逐渐的,为“串沟截直”式废弃河道(李胜利等,2017)。河道上部沉积物的粒度变化小,观察以细砂为主,夹杂直径 1~3 cm 小砾石(图 6-a)。废弃河道表面局部覆盖有 5~8 cm 的较大砾石,分析是在洪水事件时水位上涨导致河道被暂时重新激活,河水流经已经废弃的河道,带来砾石。河漫滩上部反射特征与废弃河道相似,表明两者沉积物粒度和均质性接近。

点坝(GPR 相 III)反射波形整体反射波组连续性好,厚度大约 1 m(图 6-b,6-c)。其中内部有倾斜的连续高振幅反射为低渗透侧积薄夹层,与点 1 夹层相比角度稍缓,分析是沉积时水流较缓,沉积速



a—点2无人机影像与GPR测线布置位置；b—GPR剖面B₁成像；c—GPR剖面B₂成像

图6 呼图壁河探测点2无人机影像与GPR剖面解释图

Fig. 6 UAV image and GPR profile interpretation of Point 2 in Hutubi River

率较慢所致。

在点坝和河道底部不规则分布的滞留沉积 (GPR相IV),呈不连续高振幅反射波组,该部分与点坝和废弃河道的反射振幅有明显不同,表明粒度较大的砾石滞留在了底部(图6-b,6-c)。

3.2.3 点3

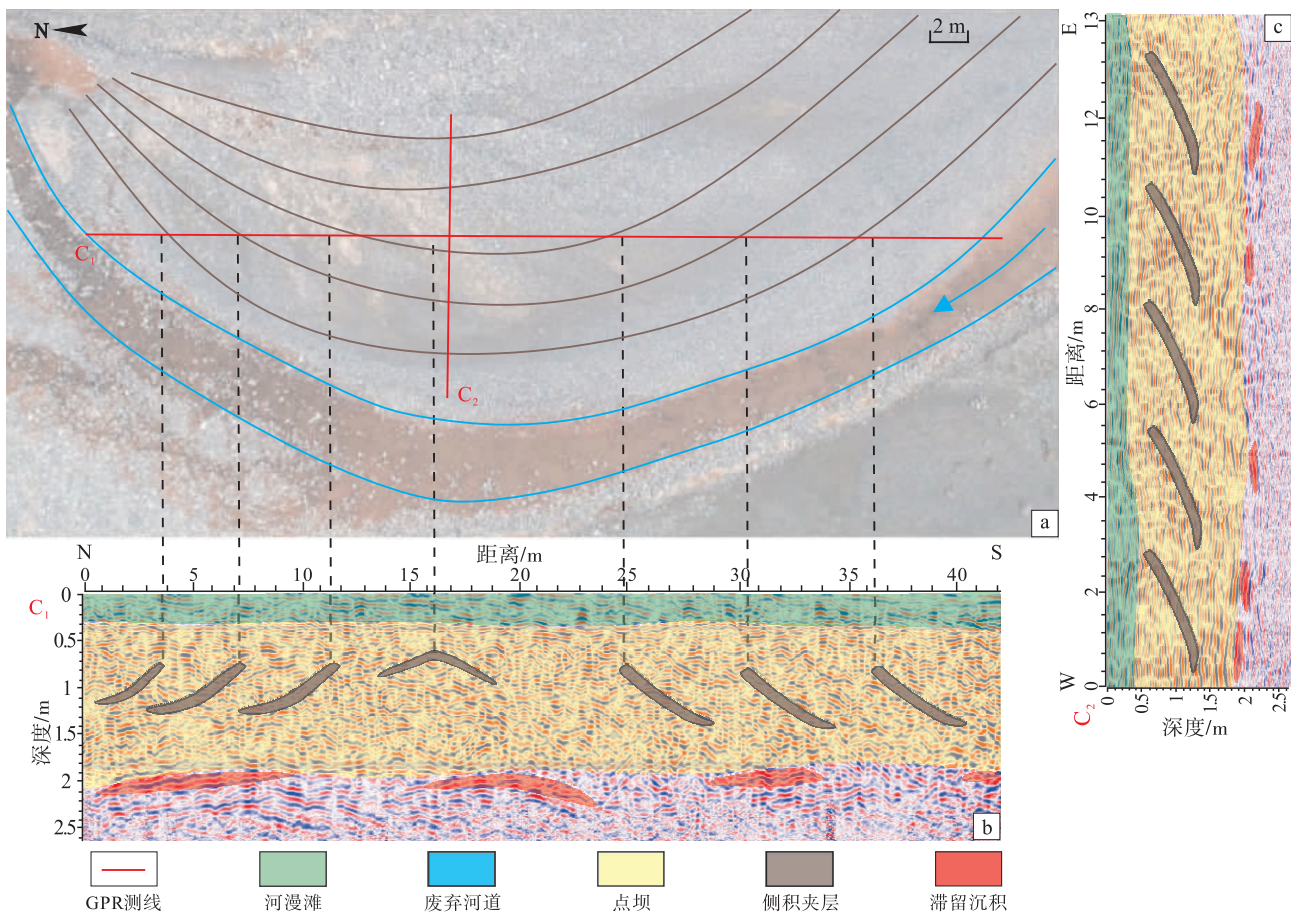
点3为正在发育过程中的点坝,GPR剖面C₁(长度42m)与C₂(长度13m),分别沿南北、东西2个方向采集,有效探测深度2.5m(图7)。

GPR剖面C₁和C₂采集时河道仍有水流,探测区内含水量较高,导致雷达波穿透力降低,信号衰减

影响了沉积物的探测(Neal,2004),在成像后反射波组相较于点1和点2剖面更为杂乱。

顶部的河漫滩(GPR相I),反射波组连续,厚度0.2~0.4m(图7-b,7-c)。与点1和点2相比,点3的河漫滩厚度小且反射波组更为杂乱,表明其发育仍处在初期,沉积物厚度薄且非均质性强(齐云龙等,2007)。

点坝(GPR相III)同样叠置在河漫滩下方,整体中高振幅,反射波形整体呈倾斜状,厚度约1.5m。在GPR剖面C₂中可观察到几组连续性较好的高振幅反射波组从左至右规律出现(图7-c),在现代沉



a—点3无人机影像与 GPR 测线布置位置; b—GPR 剖面 C_1 成像; c—GPR 剖面 C_2 成像

图 7 呼图壁河探测点 3 无人机影像与 GPR 剖面解释图

Fig. 7 UAV image and GPR profile interpretation of Point 3 in Hutubi River

积中可见粗粒和细粒交替沉积,体现出明显的韵律性(图 4-e),细粒沉积解释为低渗透侧积薄夹层。

底部的滞留沉积(GPR 相IV)分布在点坝底部,呈几组不连续的高振幅反射,形状与大小不一(图 7-b,7-c)。相较于点 1,点 3 滞留沉积反射波组更连续且范围更大,分析是由于点 3 处洪水事件水量更大且持续时间更长,导致粒径更大的砾石排列规则并更连续。

3.2.4 点 4

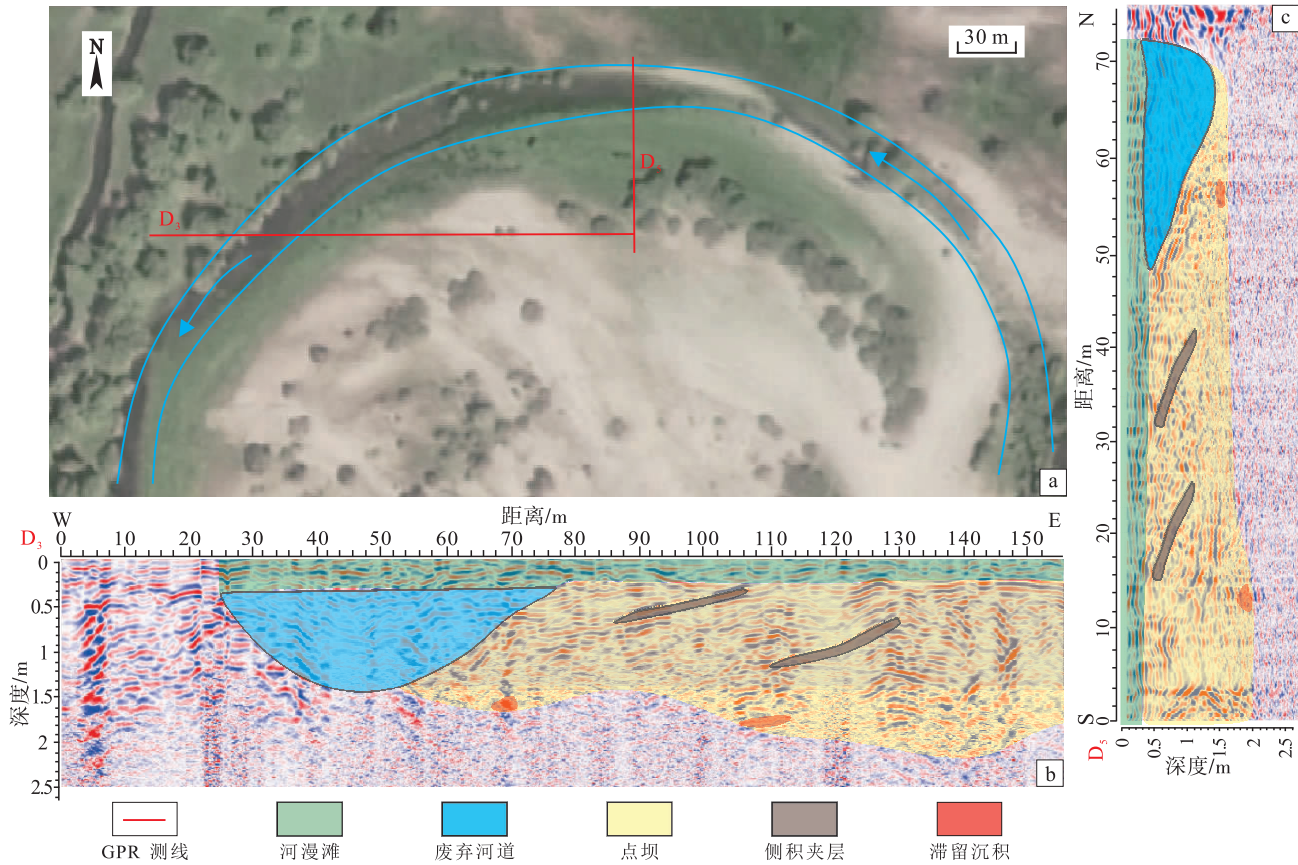
在点 4 上选取特征 GPR 剖面 D_3 (长度 154 m)与 D_5 (长度 79 m),分别沿南北、东西 2 个方向采集,有效探测深度 2.5 m(图 8)。

点 4 识别的河漫滩(GPR 相 I)发育厚度约 0.5 m,与其他探测点相比较,出现了更明显的波动,说明点 4 河漫滩沉积时发生水位突然增加事件,导致沉积物均质性降低(图 8-b)。

废弃河道(GPR 相 II)识别厚度约 1 m。反射波组整体呈顶平底凸且内部也呈现出类似形状反射线,与周围沉积物有明显的反射界面(图 8-b,8-c),说明沉积时有不同水动力,导致与周围沉积物有粒度差异(Yue *et al.*, 2019)。

GPR 剖面上识别的点坝(GPR 相 III)与废弃河道相接,反射波形整体连续性好,厚度 1~1.5 m。在其内部也识别到一定角度的连续高振幅反射,解释为低渗透侧积薄夹层。剖面 D_3 识别出的点坝有明显的厚度差异,分析在其沉积时因为水流量的不同,使得水动力大小不一,进而影响了沉积物总量和沉积厚度(图 8-b)。

在点坝和河道底部不规则分布的滞留沉积(GPR 相 IV),呈不连续高振幅反射波组。在废弃河道的外侧出现异常的大范围高振幅反射,此处为基岩,砾石磨圆差、粒度差异大,未经过河流的沉积分异作用(图 8-b,8-c)。



a—点 4 无人机影像与 GPR 测线布置位置；b—GPR 剖面 D₃ 成像；c—GPR 剖面 D₅ 成像

图 8 额尔齐斯河探测点 4 无人机影像与 GPR 剖面解释图

Fig. 8 UAV image and GPR profile interpretation of Point 4 in Irtysh River

3.3 曲流河的平—剖结构表征

利用 Google Earth 获取的额尔齐斯河曲流河段 1988—2024 年观测点 5 (47°23′42.78″N, 87°46′31.22″E) (图 1-f) 发育过程遥感影像 (图 9), 从中可分辨出活动河道、点坝的平面结构, 再结合前文利用 GPR 得到的曲流河内部沉积构造, 对点坝叠迁过程进行研究, 进而总结曲流河发育规律。平面结构表征参数用于定量描述点坝叠迁的地貌形态 (Deb *et al.*, 2012; 姚宗全等, 2020), 选取了弯度 (S , Sinuosity), 曲率 (C , Curvature) 及扩张系数 (E , Expansion index) 对点坝进行量化与表征。

弯度 (S): 用于表征河道弯曲程度, 河道长度与河谷长度的比值, 其公式可表示为: $S=L/AD$, 式中: $L=A\hat{D}$ 为河道的长度, AD 为河谷的长度;

曲率 (C): 用来表征河道的弯曲程度。其公式可为: $C=1/R$, 式中: R 为河道弯曲半径;

扩张系数 (E): 用来表征河道的扩张收敛情

况。 $E>1$, 说明河道处于扩张期; $E<1$, 说明河道处于收敛期。其公式为: $E=AD/2R$ 。

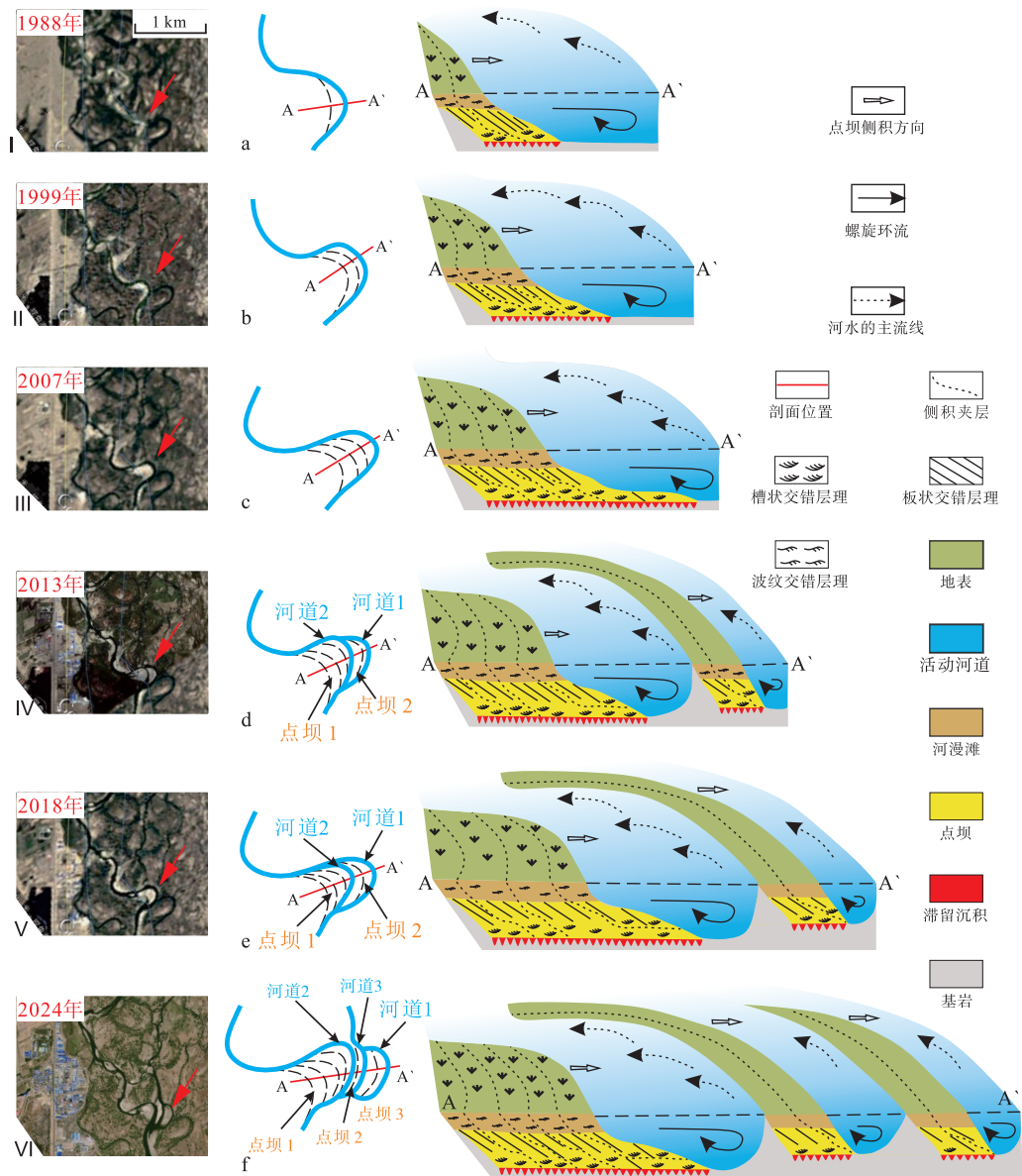
对观测点 5 (1988—2024 年) 的河道平面结构表征参数、点坝宽度、河道数量进行测量与统计 (表 2), 量化其发育规律性。

阶段 I 为 1988 年观测点遥感影像 (图 9-a), 活动河道弯曲程度较小且处于扩张期, 点坝呈现对称状。

阶段 II 为 1999 年观测点遥感影像 (图 9-b), 活动河道弯曲程度逐渐变大且处于扩张期, 但扩张系数减小。点坝弯曲顶点逐渐远离弯曲带轴线, 开始呈现出不对称状。点坝上游和下游不断扩张, 靠近河道处变宽。

阶段 III 为 2007 年观测点遥感影像 (图 9-c), 活动河道弯曲程度逐渐变大且处于扩张期, 扩张系数减小。点坝弯曲顶点更加远离弯曲带轴线, 呈现不对称状, 点坝上游和下游更加扩张。

阶段 IV 为 2013 年观测点遥感影像 (图 9-d),



a~f—分别为利用 Google Earth 获取的 1988 年、1999 年、2007 年、2013 年、2018 年、2024 年观测点 5 遥感影像与对应模式简图

图 9 额尔齐斯河观测点 5 沉积演化过程

Fig. 9 Sedimentary evolution process of Point 5 in Irtysh River

新增 1 条河道，新的活动河道发育在旧的点坝上。活动河道 1 为旧河道，弯曲程度逐渐变大且处于扩张期，扩张系数继续减小。点坝呈现不对称状；活动河道 2 为新发育的河道，弯曲程度大且处于扩张期，但扩张系数较小。

阶段 V 为 2018 年观测点遥感影像(图 9-e)。因为阶段 IV 新河道的生成，导致旧河道水流量大幅度减少，活动河道 1 扩张系数减小至趋近于 1，点坝几乎没有进一步发育，从而进入平稳期。

阶段 VI 为 2024 年观测点遥感影像(图 9-f)，

发育 3 条活动河道。活动河道 1 弯曲程度减小且处于扩张期，扩张系数又进一步增大。点坝弯曲顶点远离弯曲带轴线，呈现不对称状发育；活动河道 2 为最新冲掘出的河道，河道弯曲程度小且处于收敛期；活动河道 3 弯曲程度大且处于收敛期。

从阶段 I 到阶段 IV 活动河道曲率 (C) 持续增加，扩张系数 (E) 均大于 1 但逐渐减小。表明 1988—2013 年水流量呈下降趋势，使得点坝侧积速度逐渐减缓。阶段 IV 发育了 1 条新的河道，分析在 2013 年水流量突然增加，导致水流在原有有点坝

表 2 额尔齐斯河观测点平面结构表征参数
Table 2 Plane structure characterization parameters
of Irtysh River observation point

阶段 /年份	弯度 (S)	曲率 (C)	扩张系数 (E)	点坝宽 /km	河道 数量
I/1988	1.90	0.50	1.53	0.27	1
II/1999	2.63	0.55	1.18	0.29	1
III/2007	3.48	0.59	1.17	0.46	1
IV/2013	2.41	0.60	1.37	0.31	2
	2.04	0.84	1.05	0.15	
V/2018	4.00	0.38	1.01	0.35	2
	2.04	0.56	1.37	0.23	
VI/2024	3.14	0.44	1.50	0.59	3
	1.54	0.29	0.98	0.08	
	2.35	0.35	0.96	0.25	

上冲掘出新的河道。阶段Ⅳ到阶段Ⅴ，2条活动河道继续发育，旧河道扩张系数进一步减小，新河道扩张系数逐渐增大。阶段Ⅴ到阶段Ⅵ降水量增加，在2条旧河道中间冲掘出1条新河道。最初河道扩张系数 $E > 1$ ，表明点坝可能在后期会继续发育。而后发育的2条河道扩张系数 $E < 1$ ，点坝发育缓慢甚至停止。由此总结规律：当河道曲率 $C > 0.4$ ，扩张系数 $E > 1$ 并增大时，点坝会扩张旋转发育；扩张系数（ E ）减小并趋近于1时，点坝发育会减缓并呈对称发育；当河道曲率 $C < 0.4$ ，扩张系数 $E < 1$ 时，点坝发育缓慢接近停止。

4 讨论

4.1 砾石质曲流河沉积特征

研究区点坝上部细粒沉积占较小比例，底部与顶部粒度变化显著，具有典型正旋回序列。理想的完整韵律层从物质成分组合顺序上应该是砾—砂—泥（钟建华等，2002），但通过研究区点坝的现代沉积观察显示，很多韵律是不完整的，缺少砂或泥，甚至部分完全由砾石组成，表明此次研究的曲流河段为砾石质的。形成这种现象与水动力和物源密切相关：水动力较强，且物源以砾为主（秦国省等，2018），导致研究区形成了这种以砾石为主的韵律层。

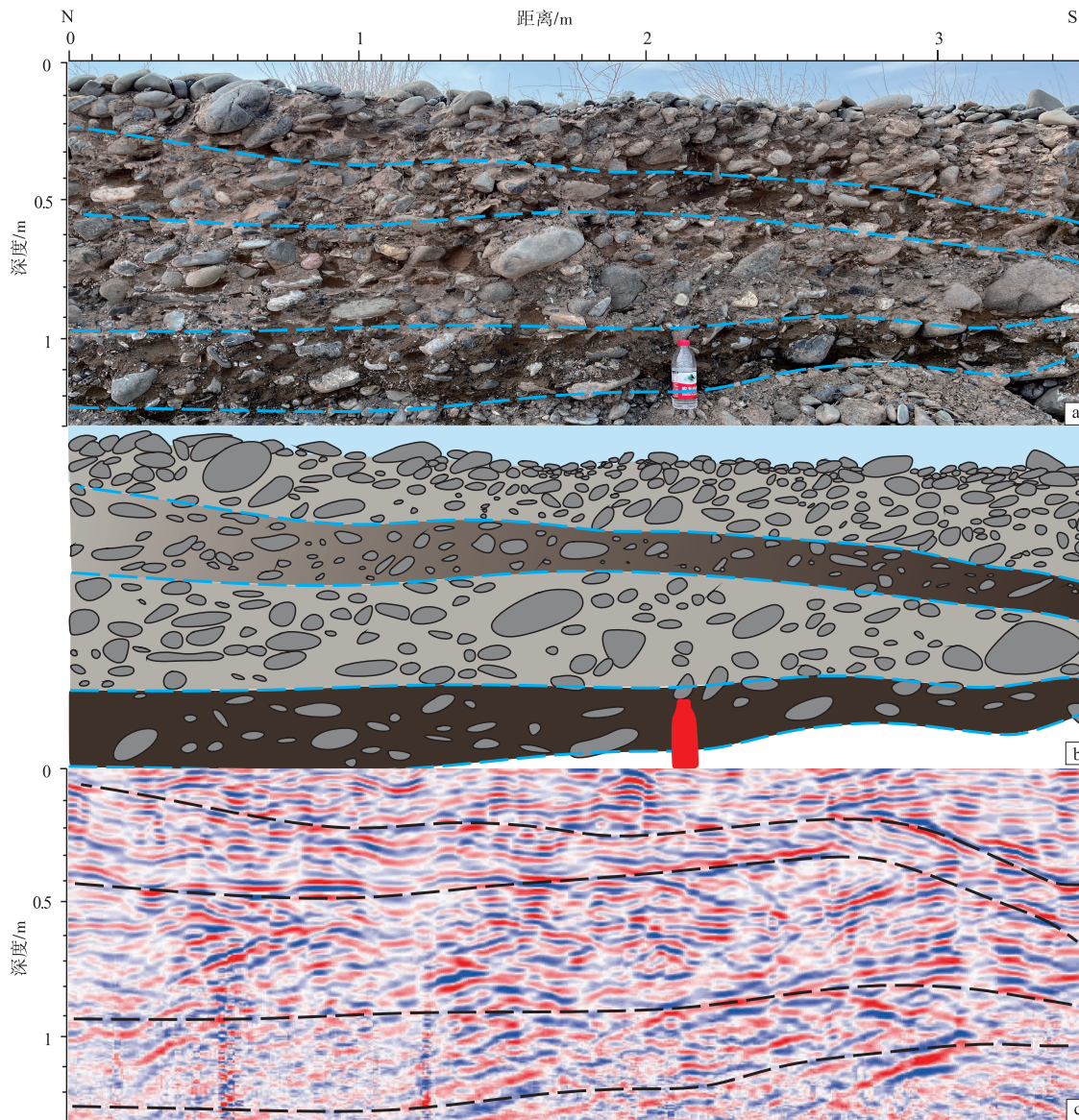
点坝内部观察到砾石分选差和分期沉积现象，单层韵律厚约1 m，砾石呈一定倾角排列（图 10-

a, 10-b）。GPR 图像上可见粒度变化的接触面表现为高振幅反射（曹淞等，2016）（图 10-c）。此现象的形成原因是一次洪水事件高峰期带来粒度最大的砾石，加之河水淘洗作用，导致底部的细粒泥沙很少（王昊等，2021）。随着洪水逐渐消退，水动力逐渐变弱，沉积下来的砾石粒径也逐渐减小，从而形成了这种正旋回韵律（石雨昕等，2019）。

4.2 点坝与废弃河道成因机制

GPR 剖面中观察到的点坝通常位于河道附近，并表现出相同的倾角方向。这表明点坝的形成与河道的横向迁移密切相关（Kostic and Aigner, 2007; Hickin *et al.*, 2009; Yue *et al.*, 2019）。点坝粒度和侧向迁移导致了曲流河沉积体系的复杂性（Dara *et al.*, 2019）。以点 4（图 1-e）为例，砾石质曲流河河道蚀凹增凸的侧积作用主要发生在洪水事件时（Davies and Gibling, 2010），点坝叠迁样式随着此过程而发生演变。水流呈螺旋状前进，表流的主流线靠近凹岸（图 11-a），受惯性作用影响，在凹岸产生壅水现象，而后一部分水流受阻形成底流，侵蚀河底（姚宗全等，2020）。同时，水流从凹岸流向凸岸，河道内的主水流产生郎缪尔环流（Nanson, 1980）。在这种不对称环流作用和剪切应力作用下，凹岸垮塌，坡度变陡（Hickin, 1974），凸岸流速减缓，底负载在主应力带迅速沉积，最终形成点坝（图 11-b）。

废弃的河道在探地雷达剖面上通常表现为顶平底凸、孤立、对称或不对称的特征（Kostic and Aigner, 2007）。废弃河道内的反射通常很弱，而与周围的沉积物呈现出清晰的界面（Hickin *et al.*, 2009; Srisunthon and Choowong, 2019）。由于离心力及惯性作用影响，河水在河道弯曲部分侧向迁移活动加剧（Yao *et al.*, 2018），河道弯曲度增大，导致在洪水高峰期，弯曲部分改道，形成新的河道，而弯曲部分遗留下来，成为废弃河道（李华等，2011）（图 11-a）。河道废弃，侧积作用才停止，点坝发育才结束（程岳宏等，2012）。只有在洪水高峰期会有少量水流从废弃河道通过，废弃河道内水体能量较弱（周新茂等，2010），以悬浮组分为主、夹杂少量跳跃组分的细粒沉积，导致废弃河道沉积粒度比周围沉积物粒度细（孔凡立等，2012）（图 11-b）。



a—点坝剖面图像；b—点坝的示意简图；c—对应 GPR 剖面图

图 10 额尔齐斯河砾石质点坝垂向分期沉积特征

Fig. 10 Vertical stage sedimentary characteristics of gravel point bar in Irtysh River

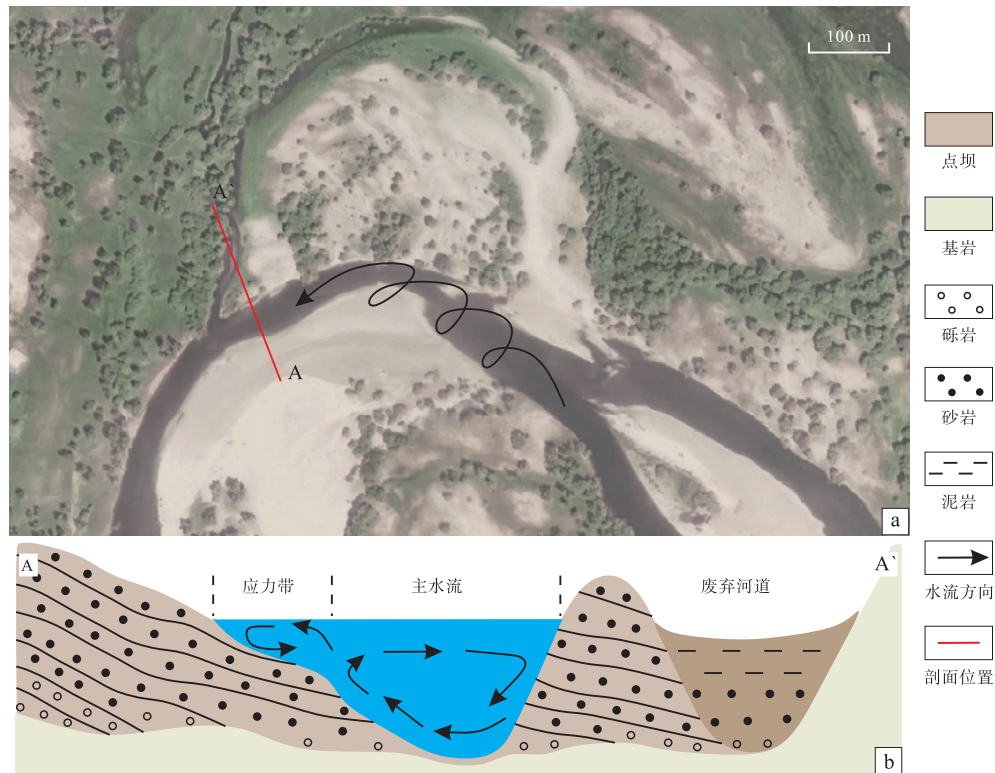
4.3 砾石质曲流河沉积模式与三维地质模型

结合 GPR 获取的内部特征、现代沉积观察、无人机与遥感影像，总结砾石质曲流河多期次综合沉积模式：

滞留沉积（涨水期）：流速接近最大，在横剖面上河道和点坝底部常见冲刷面，上次落洪后期形成的泥质夹层也常被冲蚀。因流速最大，水动力强，携带颗粒最粗，当流速稍有降低时，最粗的滚动负载（砾石）沉积于河底或点坝底部，构成砾石为主的滞留沉积。

点坝下部（落洪初期）：发育位置逐渐偏向凸岸，水体变浅，水动力降低但仍很大，最粗的滚动负载（砾石）和跳跃负载中的最粗组分（粗—中砂）成为主体沉积物，由于螺旋底流与最大流速方向存在一定夹角，易形成槽状交错层理，由此构成槽状交错层理砾石—粗砂岩岩相的下点坝底部沉积。

点坝上部（落洪中期）：水动力进一步减弱，跳跃负载中的较粗组分（中砂）按机械分异作用也逐渐沉积于滞留沉积和点坝之上。在横剖面上，沉积物向凸岸方向的粒度、层理规模逐渐变小，形



a—额尔齐斯河点坝及废弃河道遥感影像；b—点坝和废弃河道形成示意图

图 11 额尔齐斯河点坝和废弃河道的成因机制

Fig. 11 Genetic mechanism of point bar and abandoned channel in Irtysh River

成中型槽状交错层理的中砂岩岩相的点坝上部沉积。

河漫滩（落洪后期和枯水期）：水位下降至最低，流速最低，水动力弱，跳跃负载中的细粒组分（细—粉砂）和悬浮泥质沉积下来，横剖面上形成小型波状层理或水平纹层粉砂岩或泥岩岩相的河漫滩沉积。

从河道底部向上河水渐浅、流速渐降，水动力减弱，导致沉积粒度渐细，主要沉积负载由滚动变为跳跃再到悬浮。垂向上形成的沉积层理类型与规模渐变，而在不同部位形成不同岩相。横向上单一洪水事件从涨洪—落洪—枯水期分为不同时期，每一时期都具有相似水动力特征，并在横剖面上形成了相似的层理类型和沉积物。

结合以上研究，确定砾石质曲流河河漫滩、废弃河道、点坝、滞留沉积在三维空间中的构型，其中包括形态、规模、方向、叠置关系，建立三维地质模型(图 12-a, 12-b)。

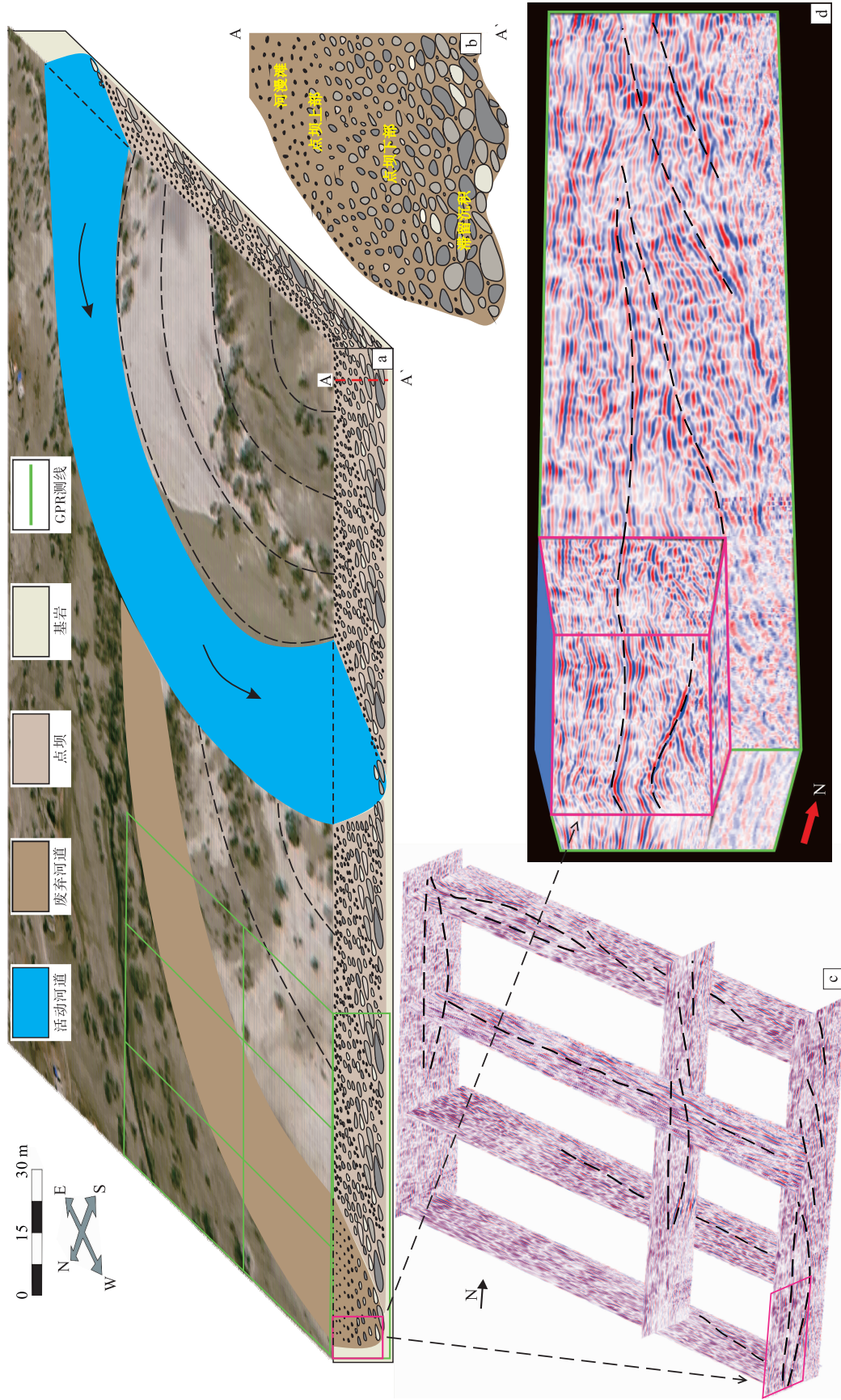
利用点 4 测得的 7 条 GPR 剖面建立网格(图 12-c)，东西方向的 3 条 GPR 剖面上废弃河道

向西迁移，废弃河道的宽度有所增加，反射特征相似；南北方向的 4 条 GPR 剖面可观察到河道底部边界的反射特征，相较东西剖面整体更为连续。GPR 三维模型中可以观察到废弃河道呈顶平底凸状，与周围沉积物边界有明显反射特征，废弃河道被点坝所包围，侧积体反射波组呈倾斜状(图 12-d)。

5 结论

1) 利用 GPR 技术识别出连续的亚平行低—中振幅反射、连续的顶平底凸型低—中振幅反射、连续倾斜中—高振幅反射以及不连续倾斜高振幅反射 4 种 GPR 相，分别对应 4 种沉积微相（河漫滩、废弃河道、点坝、滞留沉积）。

2) 通过遥感历史影像定量计算，发现曲流河曲率 (C) 和扩张指数 (E) 与点坝迁移具有良好的相关性。当河道曲率 $C > 0.4$ ，扩张系数 $E > 1$ 并增大时，点坝发育会扩张旋转；扩张系数 (E) 减小并趋近于 1 时，点坝发育会减缓并呈对称；当河



a—砾质曲流河沉积三维剖面图；b—点坝沉积粒序示意图；c—GPR 网格；d—GPR 三维模型

图 12 额尔齐斯河砾石质曲流段三维地质模型与 GPR 模型

Fig. 12 3D geological model of gravelly meandering river and GPR model of Irtysh River

道曲率 $C < 0.4$, 扩张系数 $E < 1$ 时, 点坝发育缓慢接近停止。

3) 总结了点坝垂向和横向沉积特征演变和交互作用的多期次沉积模式, 阐明了涨水期、落洪初期、落洪中期及落洪后期和枯水期的沉积地质响应与产物; 建立了砾石质曲流河三维地质模型, 为相似沉积环境下的储层预测提供指导。

参考文献 (References)

- 曹淞, 冯晖, 鹿琪, 曾昭发, 朱如凯, 白斌. 2016. 探地雷达在古河道砂岩体沉积储层刻画中的应用. 世界地质, 35(1): 223-234. [Cao S, Feng X, Lu Q, Zeng Z F, Zhu R K, Bai B. 2016. Application of GPR in depicting sedimentary reservoir of paleochannel sandstone bodies. World Geology, 35(1): 223-234]
- 程岳宏, 于兴河, 刘玉梅, 赵厚祥, 李胜利, 谭程鹏, 戴明建, 李攀. 2012. 正常曲流河道与深水弯曲水道的特征及异同点. 地质科技情报, 31(1): 72-81. [Cheng H Y, Yu X H, Liu Y M, Zhao H X, Li S L, Tan C P, Dai J M, Li P. 2012. Characteristics, similarities and differences of fluvial and deep-water sinuous channels. Bulletin of Geological Science and Technology, 31(1): 72-81]
- 耿峻岭, 高玲, 陈建江, 杜刚. 2005. 新疆呼图壁河流域水文特征分析. 干旱区研究, 22(3): 371-376. [Geng J L, Gao L, Chen J J, Du G. 2005. Analysis on the hydrological characteristics in the Hutubi River Basin, Xinjiang. Arid Zone Research, 22(3): 371-376]
- 胡光义, 陈飞, 范廷恩, 孙立春, 赵春明, 高云峰, 王晖, 宋来明. 2014. 渤海海域 S 油田新近系明化镇组河流相复合砂体叠置样式分析. 沉积学报, 32(3): 586-592. [Hu G Y, Chen F, Fan T E, Sun L C, Zhao C M, Gao Y F, Wang H, Song M L. 2014. Analysis of fluvial facies compound sandbody architecture of the Neogene Minghuazhen Formation of S Oilfield in the Bohai Bay. Acta Sedimentologica Sinica, 32(3): 586-592]
- 黄建廷, 李浩, 潘广明, 吴金涛, 黄奇, 赵澄圣. 2022. 利用保持储层结构的震反演表征曲流河储层构型. 中国海上油气, 34(5): 94-100. [Huang J T, Li H, Pan G M, Wu J T, Huang Q, Zhao C S. 2022. Meandering river reservoir architecture characterization based on seismic inversion maintaining reservoir structure. China Offshore Oil and Gas, 34(5): 94-100]
- 孔凡立, 李霖, 邹乐君, 沈晓华, 吴文渊, 苏楠. 2012. 基于 Haar 小波变换的渐弃型废弃河道相识别. 浙江大学学报(工学版), 46(3): 568-576. [Kong L F, Li J, Zou L J, Shen X H, Wu W Y, Su N. 2012. Haar wavelet transformation-based gradually abandoned channel facies identification. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 46(3): 568-576]
- 李华, 何幼斌, 王振奇. 2011. 深水高弯度水道—堤岸沉积体系形态及特征. 古地理学报, 13(2): 139-149. [Li H, He Y B, Wang Z Q. 2011. Morphology and characteristics of deep water high sinuous channel-levée system. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 13(2): 139-149]
- 李胜利, 于兴河, 姜涛, 梁星如, 苏东旭. 2017. 河流辫—曲转换特点与废弃河道模式. 沉积学报, 35(1): 1-9. [Li S L, Yu X H, Jiang T, Liang X R, Su X D. 2017. Meander-braided transition features and abandoned channel patterns in fluvial environment. Acta Sedimentologica Sinica, 35(1): 1-9]
- 李胜利, 马水平, 周练武, 黄晓娣, 韩波, 李航. 2022. 辫曲转换与共存的主要影响因素及对古代河流沉积环境恢复的启示. 地球科学, 47(11): 3960-3976. [Li S L, Ma S P, Zhou L W, Huang X D, Han B, Li H. 2022. Main influencing factors of braided-meander transition and coexistence characteristics and implications of ancient fluvial sedimentary environment reconstruction. Earth Science, 47(11): 3960-3976]
- 马世忠, 吕桂友, 闫百泉, 范广娟. 2008. 河道单砂体“建筑结构控三维非均质模式”研究. 地学前缘, 15(1): 57-64. [Ma S Z, Lü G Y, Yan B Q, Fan G J. 2008. Research on three-dimensional heterogeneous model of channel sandbody controlled by architecture. Earth Science Frontiers, 15(1): 57-64]
- 努尔兰·哈再孜. 2022. 新疆额尔齐斯河南湾水文站开河规律探讨及武开河成因分析. 水文, 42(1): 80-84. [Nuerlan H. 2022. Discussion on the river break law and mechanical break-up of Nan Wan station at Irtysh River in Xinjiang. Journal of China Hydrology, 42(1): 80-84]
- 齐云龙, 陈宁生, 秦启荣, 张海力. 2007. 砂岩及其坡积物结构面的地质雷达图像解译: 以超强地面耦合 50MHz 雷达天线探测为例. 成都理工大学学报(自然科学版), 34(1): 97-102. [Qi Y L, Chen N S, Qin Q R, Zhang H L. 2007. Using ground-penetrating radar image to interpret the structural interface in a sandstone and slope wash area; taking to use the rough terrain 50MHz antenna of GPR antenna for surveying for example. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 34(1): 97-102]
- 秦国省, 胡文瑞, 宋新民, 赵亮, 陈玉琨, 田雅洁, 匡明. 2018. 砾质辫状河构型及隔夹层分布特征: 以准噶尔盆地西北缘八道湾组露头为例. 中国矿业大学学报, 47(5): 1008-1020. [Qin G S, Hu W R, Song X M, Zhao L, Chen Y K, Tian Y J, Kuang M. 2018. Gravel braided river architecture and inter-layers distribution: a case study of Jurassic Badaowan formation outcrop in the northwest of Junggar basin. Journal of China University of Mining & Technology, 47(5): 1008-1020]
- 石雨昕, 高志勇, 周川闽, 翟弈程, 樊小容, 冯佳睿. 2019. 新疆博斯腾湖北缘现代冲积扇与扇三角洲平原分支河流体系的沉积特征与意义. 石油学报, 40(5): 542-556. [Shi Y X, Gao Z Y, Zhou C M, Zhai Y C, Fan X R, Feng J R. 2019. Sedimentary characteristics and significance of distributive fluvial system of modern alluvial fan and fan delta plain in the northern margin of Bosten lake, Xinjiang. Acta Petrolei Sinica, 40(5): 542-556]
- 谭绍泉, 刘秦生, 徐锦玺, 张庆淮, 邸志新. 2003. 地质雷达技术在表层结构调查中的应用与研究. 石油物探, 42(1): 59-62, 67. [Tan S Q, Liu T S, Xu J X, Zhang Q Y, Di Z X. 2003. Application of ground penetrating radar in surface seismic and geologic survey.

- Geophysical Prospecting for Petroleum, 42(1): 59-62, 67]
- 王昊, 崔鹏, Carling Paul A. 2021. 高能洪水沉积研究综述. 地学前缘, 28(2): 140-167. [Wang H, Cui P, Carling P A. 2021. The sedimentology of high-energy outburst flood deposits: an overview. Earth Science Frontiers, 28(2): 140-167]
- 王家豪, 周江羽, 杨香华, 陈振林. 2018. 砾质曲流河的沉积特点及成因: 以秦皇岛大石河为例. 地球科学, 43(S1): 277-286. [Wang J H, Zhou J Y, Yang X H, Chen Z L. 2018. Sedimentary characteristics and geneses of pebbly meandering river: a case from Dashihe River in Qinghuangdao Area. Earth Science, 43(S1): 277-286]
- 徐琪, 沈含笑, 董少春, 史宇坤, 樊隽轩. 2023. 地质露头与标本的三维数字化现状与展望. 高校地质学报, 29(3): 403-418. [Xu Q, Shen H X, Dong S C, Shi Y K, Fan J X. 2023. 3D Digitization of geological outcrops and specimens: status and prospects. Geological Journal of China Universities, 29(3): 403-418]
- 姚宗全, 德勒恰提·加娜塔依, 张明玉, 孙乐, 王文峰, 潘品百, 黄博超. 2020. 准噶尔盆地呼图壁河侏罗系齐古组点坝砂体叠迁样式及演化特征. 地质学报, 94(5): 1578-1590. [Yao Z Q, Deleqiyati J, Zhang M Y, Sun L, Wang W F, Pan P B, Huang B C. 2020. The lateral accretion styles and its evolution of point bar for the Qigu Formation of Jurassic in Junggar basin Toutunhe river. Acta Geologica Sinica, 94(5): 1578-1590]
- 岳大力, 吴胜和, 刘建民. 2007. 曲流河点坝地下储层构型精细解剖方法. 石油学报, 25(4): 99-103. [Yue D L, Wu S H, Liu J M. 2007. An accurate method for anatomizing architecture of subsurface reservoir in point bar of meandering river. Acta Petrolei Sinica, 25(4): 99-103]
- 岳大力, 胡光义, 李伟, 范廷恩, 胡嘉靖, 乔慧丽. 2018. 井震结合的曲流河储层构型表征方法及其应用: 以秦皇岛 32-6 油田为例. 中国海上油气, 30(1): 99-109. [Yue D L, Hu G Y, Li W, Fan T E, Hu J J, Qiao H L. 2018. Meandering fluvial reservoir architecture characterization method and application by combining well logging and seismic data: a case study of QHD32-6 oilfield. China Offshore Oil and Gas, 30(1): 99-109]
- 张宪国, 储飞跃, 黄德榕, 董春梅, 刘晓宇. 2022. 二维卷积神经网络驱动的砂地比地震预测方法. 中国矿业大学学报, 51(6): 1128-1137. [Zhang X G, Chu F Y, Huang D R, Dong C M, Liu X Y. 2022. 2D convolutional neural network driven sandstone ratio prediction method with seismic data. Journal of China University of Mining & Technology, 51(6): 1128-1137]
- 钟建华, 刘云田, 姜波, 管全俊, 张跃忠. 2002. 柴达木盆地英雄岭曲流河边滩的沉积学特征. 石油学报, 23(3): 43-47. [Zhong J H, Liu Y T, Jiang B, Guan Q J, Zhang Y Z. 2002. Sedimentary features of the point bar in intermane (seasonal) meandering stream-taking the meandering stream developed in Hero Hill of Qaidam Basin as an example. Acta Petrolei Sinica, 23(3): 43-47]
- 周新茂, 高兴军, 季丽丹, 陈建阳, 王兴明, 徐薇薇, 张晶. 2010. 曲流河废弃河道的废弃类型及机理分析. 西安石油大学学报(自然科学版), 25(1): 19-23. [Zhou M X, Gao X J, Ji L D, Chen J Y, Wang X M, Xu W W, Zhang J. 2010. Analysis on the types and the sedimentation mechanism of the abandoned channel in meandering river. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 25(1): 19-23]
- Bathurst J C, Benson I A, Valentine E M, Nalluri C. 2002. Overbank sediment deposition patterns for straight and meandering flume channels. Earth Surface Processes and Landforms, 27(6): 659-665.
- Beauprêtre S, Manighetti I, Garambois S, Dominguez S. 2013. Stratigraphic architecture and fault offsets of alluvial terraces at Te Marua, Wellington Fault, New Zealand, revealed by pseudo-3D GPR investigation. Journal of Geophysical Research-Solid Earth, 118(8): 4564-4585.
- Bridge J S, Alexander J, Collier R E L, Gawthorpe R L, Jarvis J. 1995. Ground-penetrating radar and coring used to study the large-scale structure of point-bar deposits in three dimensions. Sedimentology, 42(6): 839-852.
- Dara R, Kettridge N, Rivett M O, Krause S, Gomez O D. 2019. Identification of floodplain and riverbed sediment heterogeneity in a meandering UK lowland stream by ground penetrating radar. Journal of Applied Geophysics, 171: 15.
- Davies N S, Gibling M R. 2010. Paleozoic vegetation and the Siluro-Devonian rise of fluvial lateral accretion sets. Geology, 38(1): 51-54.
- Deb M, Das D, Uddin M. 2012. Evaluation of meandering characteristics using RS & GIS of Manu River. Journal of Water Resource Protection, 4(3): 163-171.
- Gizzi F T, Leucci G. 2018. Global research patterns on ground penetrating radar (GPR). Surveys in Geophysics, 39(6): 1039-1068.
- Gu Z K, Shi C X, Yang H, Yao H F. 2019. Analysis of dynamic sedimentary environments in alluvial fans of some tributaries of the upper Yellow River of China based on ground penetrating radar (GPR) and sediment cores. Quaternary International, 509: 30-40.
- Guo W, Dong C M, Lin C Y, Zhang T, Zhao Z X, Li J. 2022. 3D sedimentary architecture of sandy braided river, based on outcrop, unmanned aerial vehicle and ground penetrating radar data. Minerals, 12(6): 19.
- Hagstrom C A, Leckie D A, Smith M G. 2018. Point bar sedimentation and erosion produced by an extreme flood in a sand and gravel-bed meandering river. Sedimentary Geology, 377: 1-16.
- Hickin E J. 1974. The development of meanders in natural river-channels. American Journal of Science, 274(4): 414-442.
- Hickin A S, Kerr B, Barchyn T E, Paulen R C. 2009. Using ground-penetrating radar and capacitively coupled resistivity to investigate 3-D fluvial architecture and grain-size distribution of a gravel floodplain in Northeast British Columbia, Canada. Journal of Sedimentary Research, 79(5-6): 457-477.
- Himi M, Armendariz A, Teira L, González J, Ibáñez J, Haïdar B M, Casas A. 2016. Geophysical and archaeological evidences of buried Epi-palaeolithic, Neolithic, Bronze Age and Roman Architecture in West-Central Syria. Archaeological Prospection, 23(4): 273-285.
- Hugenholtz C H, Paulen R C, Wolfe S A. 2007. Ground-penetrating-radar

- Investigation of Relict channel bars of the Meander River Spillway, Northern Alberta. Geological Survey of Canada.
- Hugenschmidt J. 2000. Railway track inspection using GPR. *Journal of Applied Geophysics*, 43(2-4): 147-155.
- Korus J T, Joeckel R M, Tuckers S T. 2020. Genesis of giant, bouldery bars in a Miocene gravel-bed river: insights from outcrop sedimentology, UAS-SfM photogrammetry, and GPR. *Journal of Sedimentary Research*, 90(1): 27-47.
- Kostic B, Aigner T. 2007. Sedimentary architecture and 3D ground-penetrating radar analysis of gravelly meandering river deposits (Neckar Valley, SW Germany). *Sedimentology*, 54(4): 789-808.
- Kowalsky M B, Dietrich P, Teutsch G, Rubin Y. 2001. Forward modeling of ground-penetrating radar data using digitized outcrop images and multiple scenarios of water saturation. *Water Resources Research*, 37(6): 1615-1625.
- Lahouar S, Al-Qadi I L. 2008. Automatic detection of multiple pavement layers from GPR data. *Ndt & E International*, 41(2): 69-81.
- Lunt I A, Bridge J S, Tye R S, Bridge J S, Hyndman D W. 2004. Development of a 3-D depositional model of braided-river gravels and sands to improve aquifer characterization. *SEPM Society for Sedimentary Geology*.
- Malagodi S, Orlando L, Piro S, Rosso F. 1996. Location of archaeological structures using GPR method: three-dimensional data acquisition and radar signal processing. *Archaeological Prospection*, 3(1): 13-23.
- Nanson G C. 1980. Point-bar and floodplain formation of the meandering Beatton River, northeastern British-Columbia, Canada. *Sedimentology*, 27(1): 3-29.
- Neal A. 2004. Ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principles, problems and progress. *Earth-Science Reviews*, 66(3-4): 261.
- Nelson P A, Morgan J A. 2018. Flume experiments on flow and sediment supply controls on gravel bedform dynamics. *Geomorphology*, 323: 98-105.
- Ni X B, Zhang J J, Chen K, Zhang G Z, Wang B L, Liu Z F, Lin Y. 2023. Geostatistical inversion method based on seismic waveform similarity. *Applied Geophysics*, 20(2): 186-197.
- Roksandić M M. 1978. Seismic facies analysis concepts. *Geophysical Prospecting*, 26(2): 383-398.
- Rucsandra M C, Kristian S, Robert B S, John B T, George A M, Wang D M, Steven S, Craig B F, Ari M. 2001. Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D ground-penetrating radar: example from the middle Cretaceous Ferron Sandstone, east-central Utah. *Geoscience World*, 85(9): 1583-1608.
- Sangree J B, Widmier J M. 1979. Interpretation of depositional facies from seismic data. *Geophysics*, 44(2): 131-160.
- Shan X, Yu X H, Clift P D, Tan C P, Jin J N, Li M T, Li W. 2015. The ground penetrating radar facies and architecture of a paleo-spit from Huangqihai Lake, North China: implications for genesis and evolution. *Sedimentary Geology*, 323: 1-14.
- Skelly R L, Bristow C S, Ethridge F G. 2003. Architecture of channel-belt deposits in an aggrading shallow sandbed braided river: the lower Niobrara River, northeast Nebraska. *Sedimentary Geology*, 158(3): 249-270.
- Smith G H S, Ashworth P J, Best J L, Lunt I A, Orfeo O. 2009. The sedimentology and alluvial architecture of a large braid bar, Rio Parana, Argentina. *Journal of Sedimentary Research*, 7-8(79): 629-642.
- Srisunthorn P, Choowong M. 2019. Quaternary meandering evolution and architecture of a point bar in the Mun River on the sandstone-dominated Khorat Plateau from northeastern Thailand. *Quaternary International*, 525: 25-35.
- Van D R L, Schlager W. 2000. Identifying causes of ground-penetrating radar reflections using time-domain reflectometry and sedimentological analyses. *Sedimentology*, 47(2): 435-449.
- Vandenbergh J, Overmeeren R. 1999. Ground penetrating radar images of selected fluvial deposits in the Netherlands. *Sedimentary Geology*, 128(3): 245-270.
- Wooldridge C L, Hickin E J. 2005. Radar architecture and evolution of channel bars in wandering gravel-bed rivers: Fraser and Squamish Rivers, British Columbia, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 75(5): 844-860.
- Yao Z Q, Yu X H, Shan X, Li S L, Li S L, Li Y L, Tan C P, Chen H L. 2018. Braided-meandering system evolution in the rock record: implications for climate control on the Middle-Upper Jurassic in the southern Junggar Basin, North-West China. *Geological Journal*, 53(6): 2710-2731.
- Yue D L, Li W, Wang W R, Hu G Y, Shen B B, Wang W F, Zhang M L, Hu J J. 2019. Analyzing the architecture of point bar of meandering fluvial river using ground penetration radar: a case study from Hulun Lake Depression, China. *Interpretation*, 7(2): 437-454.
- Zuk T. 2011. Acquisition, 3-D Display and Interpretation of GPR Data in Fluvial Sedimentology. Masteral dissertation of University of Birmingham.

(责任编辑 郑秀娟; 英文审校 龚承林)