

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2023.02.007

<https://xuebao.xaut.edu.cn>

引文格式:胡赛寅,刘宗堡,卢志霖,刘警阳.黑河分支河流体系地貌特征和沉积模式[J].西安理工大学学报,2023,39(2):216-226.

HU Saiyin, LIU Zongbao, LU Zhilin, LIU Jingyang. The geomorphological characteristics and sedimentary model for Heihe distributive fluvial system[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2023, 39(2):216-226.

黑河分支河流体系地貌特征和沉积模式

胡赛寅¹, 刘宗堡¹, 卢志霖², 刘警阳¹

(1. 东北石油大学 地球科学学院, 黑龙江 大庆 163318; 2. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358)

摘要:为探究温带干旱区分支河流体系(DFS)的沉积模式,选取黑河DFS为靶区,利用卫星遥感影像和地貌、气候等资料,首先确定了黑河DFS的宏观形态、内部组成和地貌类型,进而研究了黑河DFS的控制因素及沉积模式。研究表明:①黑河DFS面积约 3.01×10^4 km²,最大半径超过300km,近五十年来黑河DFS的边界、河道位置和河流类型保持稳定,但内部湖泊的水体面积波动明显;②根据地貌、沉积和水系特征将黑河DFS分为近端、中部和远端三部分,DFS发育有冲积平原、冲洪积平原和沙地等30种地貌类型,其中湖泊地貌和风积地貌分布广泛;③黑河DFS形态受构造控制,气候和径流是其演化的主要控制因素;④黑河DFS是第四纪干旱气候下形成的巨型扇,主要沉积动力为河流、洪水、湖泊和风,近端、中部主体为冲积平原和冲洪积平原,远端主体为泛溢平原和DFS终端湖泊,具有3类河道沉积模式,分别为单一曲-辫转化、复杂放射性曲辫共存和萎缩放射性曲辫共存。

关键词:黑河; DFS; 地貌特征; 沉积模式

中图分类号: P512.2, P95

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2023)02-0216-11

The geomorphological characteristics and sedimentary model for Heihe distributive fluvial system

HU Saiyin¹, LIU Zongbao¹, LU Zhilin², LIU Jingyang¹

(1. School of Earth Sciences, Northeast Petroleum University, Daqing 163318, China;

2. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China)

Abstract: In order to explore the sedimentary model of distributive fluvial systems(DFS) in temperate arid area, taking Heihe DFS as the target area, using satellite remote sensing images, geomorphic data and climate data, this paper first determines the macro morphology, internal composition and landform types of Heihe DFS, with the controlling factors and sedimentary model of Heihe DFS studied. The results are as follows. ①The area of Heihe DFS is 3.01×10^4 km² and its biggest radius is over 300 km; the boundary, the river location and type of Heihe DFS remains stable but the area of internal lake changes visibly in recent 50 years. ②According to the characteristics of landform, sedimentation and water system, Heihe DFS is divided into three zones: proximal zone, middle zone, and distal zone; there are 30 landform types such as alluvial plain, alluvial-proluvial plain and sandy land, and the landform of lake and aeolian are widely distributed. ③The form of Heihe DFS is limited by structure, and climate and runoff are the main con-

收稿日期: 2022-04-22; 网络首发日期: 2022-09-14

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20220913.1539.008.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42172161); 黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2020D001); 中国石油科技创新基金项目(2020D-5007-0102)

第一作者: 胡赛寅,女,硕士生,研究方向为现代沉积。E-mail: pinglinghsy@126.com

通信作者: 刘宗堡,男,博士,教授,博导,研究方向为储层地质学。E-mail: lzbqpi@163.com

trolling factors of its evolution. ④Heihe DFS is a megafan formed in the arid climate in Quaternary; its sedimentary dynamics are river, flood, lake and wind; the main area of the proximal zone and middle zone are alluvial plain and alluvial-proluvial plain, and the main area of the distal zone is flood plain and DFS's terminal lakes. There are three types of the channel sedimentary model-single channel form meandering river to braided river, complex radial meandering rivers and braided rivers, atrophic radial meandering rivers and braided rivers.

Key words: Heihe River; DFS; geomorphological characteristics; sedimentary model

分支河流体系(distributive fluvial systems, DFS)指河流携带的碎屑颗粒在河流进入盆地后,形成放射状展布的沉积体系^[1]。DFS通常由近端、中部和远端三部分组成,其中近端和中部储集性较好,利于形成范围广、规模大的油气优质储层^[2-3]。DFS最早由 Weissmann 等^[1]于 2010 年提出, Hartley 等^[4]进一步研究了 DFS 的类型、展布、延伸长度、构造背景和环境特征,提出了 DFS 发育有 6 种河道模式和五种末端类型,同期 Davidson 等^[5]将 DFS 沉积模式简化为 3 种。张昌民等^[6]以冲积扇概念的演变为主线,总结出 DFS 的发育特征和地质意义。吕俊岭等^[7]利用水槽模拟实验重建了干旱区 DFS 的沉积过程,并提出了干旱区 DFS 沉积演化的三个阶段。赵芸等^[8]介绍了 DFS 的概念、规模、特征和研究方法,如遥感影像解译、无人机航拍、沉积露头类比和古土壤分析等。研究表明,世界上 70% 的 DFS 分布在干旱区,如撒哈拉沙漠、中亚地区、澳大利亚大陆内部和我国西北干旱区^[1,9-10]。根据扇体规模(半径和面积),DFS 分为冲积扇(半径小于 30 km,面积小于 100 km²)、河流扇(半径在 30~100 km 之间,面积为 100~1 000 km²)和巨型扇(半径大于 100 km,面积为 1 000~100 000 km²)三种^[4]。其中巨型扇由于地貌条件限制研究成果不足,且已有研究大多针对热带或亚热带气候发育的巨型扇^[11-14],而对温带干旱区特别是北半球温带干旱区巨型扇的地貌特征和沉积模式鲜有研究。

黑河是我国第二大内流河,其末端形成的分支河流体系(简称黑河 DFS)不仅是我国西北干旱区中少见的巨型扇,也是世界上典型的温带干旱区巨型扇,在地貌类型、沉积特征、环境变化和入地关系等方面具有很高的研究价值。长期以来,许多学者就黑河下游的水系变迁、气候变化、群落演替和土地利用等方面开展了深入研究,积累了详实的资料和成果^[15-20]。黑河 DFS 是第四纪形成的分支河流体系^[21-23],位于环境变化的敏感区和脆弱区,形成后易被其他自然地理要素改造,呈现出独具特色的地貌类型、河流展布和沉积序列,已经成为当地生产生活的重要场所和沙漠边缘的生态屏障。本文通过卫星遥感影像解译,同时结合相关的地

质资料和 DEM 数据,确定了黑河 DFS 的边界形态、内部结构和地貌类型,并讨论了黑河 DFS 演化的控制因素和沉积模式。本研究有利于进一步了解黑河下游的地质环境,可为地下储层类比预测^[24]和温带干旱区 DFS 的沉积构型提供借鉴。

1 研究区概况

黑河 DFS 位于 99.2°~101.8°E 和 39.8°~42.6°N 之间,南北跨越甘肃省和内蒙古自治区。研究区地处黑河下游,地势东南高、西北低,平均海拔 1 500 m(图 1)。

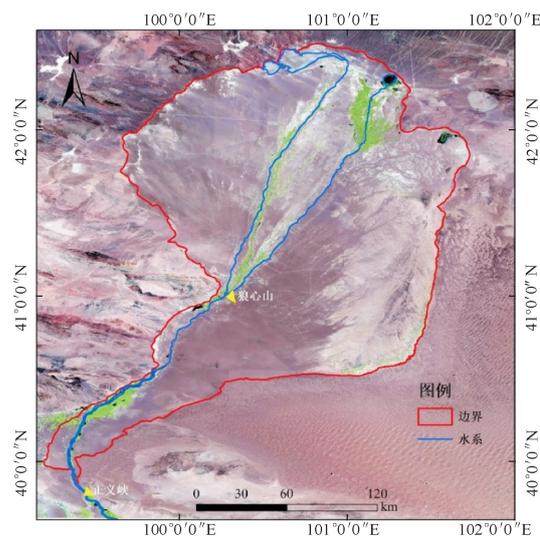


图 1 研究区

Fig. 1 Study area

从地貌单元看,研究区位于阿拉善高原,东邻巴丹吉林沙漠,西侧与额济纳戈壁区接壤,内部发育有大量湖盆洼地和沙漠^[25-26]。DFS 顶点在正义峡以下约 14 km 处,DFS 内黑河先向北东方向流动,而后在狼心山分为东河、西河两支,分别汇入东、西居延海,形成了面积约 3.01×10^4 km² 的黑河 DFS。历史上,黑河曾汇入居延泽,成为发展绿洲农业和军事防御的重要场所,后随着气候变化和上游人类活动,黑河下游来水量减少,居延泽逐渐萎缩,而后形成东居延海、西居延海等黑河尾间湖泊。研究区属于大陆性气候中的干旱荒漠和极端干旱气候,具有降水量少、蒸发性强、昼夜温差大和风沙多等特

点^[27],造成土壤缺水、植被稀疏和砂石发育。

2 数据与方法

2.1 数据来源

本次研究所用 Landsat 系列影像和哨兵影像来自地理空间数据云(www.gscloud.cn/)和美国地质调查局(https://glovis.usgs.gov/),DEM 数据来自地理空间数据云(www.gscloud.cn/),各类地质图和部分水文资料来自地质云(https://geocloud.cgs.gov.cn/#/home)。地貌数据来自黑河流域地貌类型图和黑河流域沙漠(沙地)分布数据集(http://www.ncdc.ac.cn/portal/);气象数据取自中国 1 km 分辨率月平均气温数据集和逐月降水量数据集(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/),用于计算 1950 年以来黑河流域多年平均气温和年降水量,并绘制等温线和等降水量线;土壤质地数据取自面向陆面模拟的中国土壤数据集和中国土壤水分数据集(2002—2018)(https://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/),用于分析土壤质地、土壤含水量和砾石分布;部分水文资料来自中国河流泥沙公报(http://www.mwr.gov.cn/)。上述数据能够保证相关研究的准确性和真实性。

2.2 研究方法

2.2.1 DFS 边界识别

本次研究首先通过地质图确定了 DFS 的顶点、河道范围和终端位置,随后利用 Landsat MSS 和 TM 影像 SWIR2、NIR、Green 波段,OLI 影像 SWIR2、NIR、Red 波段进行假彩色合成,最终确定了可目视

解译的黑河 DFS 边界。从假彩色合成的影像上看,DFS 起点处河流已经出山,河流沉积突然变明显;研究区北侧和西侧发育有大量辫状河道,东侧为表面凹凸不平的沙漠,东南侧存在全新世形成的古代湖泊;此外,在难以确定边界的区域,借助天地图影像等更高分辨率(不足 10 m)影像进行目视解译。

本次研究选用影像的成像时间为每年 5~10 月,云量小于 5%,影像质量能够满足工作要求。误差主要为影像分辨率误差,计算公式^[28]为:

$$\epsilon = \frac{N \cdot \lambda_L^2}{2} \quad (1)$$

式中: ϵ 为误差面积(m^2); N 为影像分辨率(Landsat MSS 影像取 60 m,Landsat TM 影像取 30 m,Landsat OLI 影像取 30 m); λ_L 为 DFS 边界经过的像元个数。

2.2.2 地貌类型划分

根据 DEM 数据将研究区分为中海拔区域(1 000 m 以上)和低海拔区域(1 000 m 以下),并初步划分平原、台地和丘陵等基本地貌类型,然后将 Landsat OLI 影像 SWIR2、NIR、Red 波段进行假彩色合成,目视解译各地貌类型的边界,结合黑河流域 1:100 万地貌类型图、研究区地质图和土壤植被等资料进行进一步修订,最终确定黑河 DFS 的 30 种地貌类型。其中沙地的划分和命名参考黑河流域 1:10 万沙地分布数据集,各地貌类型的名称及特征详见表 1。因缺少野外考查资料,本研究的地貌类型难免存在误差,不适合小尺度地貌研究。

表 1 黑河 DFS 地貌类型及特征

Tab.1 Geomorphological types and characteristics of Heihe DFS

地貌类型	地貌特征
河流及河漫滩	河流呈蓝色或蓝黑色;河漫滩沿河分布,有稀疏的植被,海拔基本与河流相同
河流阶地	紧邻河漫滩,表面不光滑,偏灰白色,有植被覆盖,偶有古河道,分为中海拔和低海拔两类
干燥洪积平原	洪积物覆盖区,浅紫红色,冲沟及古河道发育,植被较少,发生干燥作用,分为中海拔和低海拔两类
中海拔洪积高原	洪积物覆盖区,紫红色,有冲沟,植被较少,干燥作用不明显,表面不甚光滑,海拔高于干燥洪积平原
低海拔冲积平原	冲积物覆盖区,浅紫红色,沉积物颗粒不明显
低海拔冲积湖积平原	靠近黑河尾间湖泊,位于冲积物和湖积物交界地带,偶有小型湖泊,冲沟和分流河道较少
低海拔湖积冲积平原	位于 DFS 北部冲积物和湖积物交界地带,分流河道发育,植被覆盖较好,离湖泊较远
湖积平原	湖积物覆盖区,紧邻湖泊或古代湖泊,由湖泊淤积、死亡形成,分为中海拔和低海拔两类
湖泊	面状水体,深蓝色或浅蓝色(水中含盐)
低海拔湖滩	邻近黑河尾间湖泊,湖积物覆盖,冲刷面隐约可见,或有干涸湖泊痕迹,洪水期时可被湖水淹没
低海拔湖积台地	湖积物覆盖区,边缘较陡
中海拔盐湖平原	分布在 DFS 西南部,乳白色面状分布,有古河道汇入
低海拔干燥旱谷平原	古代湖泊边缘,乳白色带状分布,有多条古河道
中海拔干燥剥蚀高原	内部平坦光滑,冲沟和古河道很少,表面呈紫红色,存在干燥剥蚀作用

表 1(续)

地貌类型	地貌特征
中海拔干燥剥蚀台地	边缘较陡,其余特征与中海拔干燥剥蚀高平原相似
残丘	基岩裸露地表,海拔较高,颜色偏深,表面有山脊线
戈壁	地表以碎砾石为主,植被覆盖度在 5% 以下
中海拔丘陵	分布于 DFS 西北部,海拔高于周围湖泊,基岩地层
流动沙地	沙粒含量(1~0.05mm)超过 98%,植被覆盖度低于 5%,根据海拔分为中海拔和低海拔两类
半流动沙地	沙粒含量 93%~98%,植被覆盖度 5%~20%,根据海拔分为中海拔和低海拔两类
半固定沙地	沙粒含量 91%~93%,植被覆盖度 21%~50%,根据海拔分为中海拔和低海拔两类
固定沙地	沙粒含量低于 89%,植被覆盖度超过 50%,根据海拔分为中海拔和低海拔两类
新月形沙丘和沙丘链	平面形态呈新月形,两侧有顺风向延伸的沙角

3 黑河 DFS 地貌特征

3.1 宏观地貌特征

黑河 DFS 呈南西—北东方向展布,上窄下宽,面积约 $3.01 \times 10^4 \text{ km}^2$,最大半径约 310 km,最宽处约 167 km,扇顶角约 71.02° ,平均海拔 1 003.93 m,平均坡度 0.96° ,平均地表起伏度 2.37° 。为了研究黑河 DFS 整体地貌特征,绘制了 3 条纵剖面线和 8 条横剖面线,间隔 500m 取点,测量各点的高程、坡度和地表起伏度(图 2),三条纵剖面的高程与到顶点的距离具有较好的线性负相关。冲积物和冲洪积物覆盖区等高线向东北方向突出,与 DFS 延伸方向一致,湖积物覆盖区等高线向西南方向突出,与 DFS 延伸方向相反,900m 等高线形成两个封闭的

环形区域,与西居延海和古居延泽范围大致相同(图 2(a))。各横剖面线等高线形态特征相似,可能是区内古代湖泊造成的。图 2(b)和(c)表明,各剖面线地形起伏特征与坡度特征基本一致,除斜穿剖面线 *e-g* 的长条形区域外,其余坡度和地表起伏较大的区域可能存在湖泊、残丘和沙地。各剖面线坡度统计表明:纵剖面坡度的均值与 DFS 平均坡度相近,但中位数和标准差低于整个 DFS(坡度中位数 0.788° ,标准差 0.934);横剖面 *a*、*d* 坡度波动明显,横剖面 *d*、*e*、*g* 的均值与整个 DFS 坡度接近。综上所述,DFS 中部坡度较低且没有较大波动,但有陡坡出现,而 DFS 的边缘区域特别是起点处存在较大的坡度波动。坡度是构造活动的一种表现^[29],因此黑河 DFS 的坡度特征可能与 DFS 边缘和内部的构造有关。

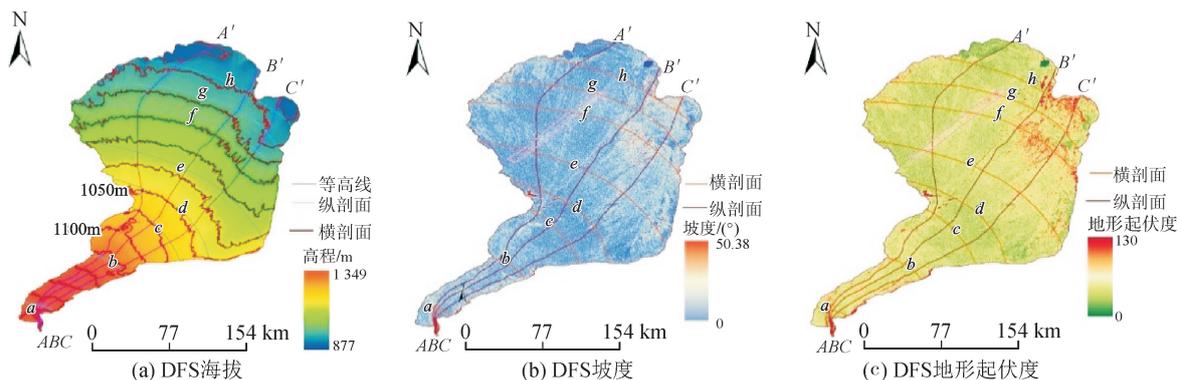


图 2 黑河 DFS 整体地貌特征

Fig. 2 Overall geomorphological characteristics of Heihe DFS

利用 10 期遥感影像研究 1973 年以来黑河 DFS 的形状变化特征,并计算 DFS 的面积。结果表明:1986 年 DFS 面积最大,1973 年 DFS 面积最小(图 3),且各期影像解译的面积误差与提取的 DFS 面积之比小于 $1.4/1000$ 。不同时期 DFS 边界的西侧和南侧重合度很高,东北部重合度较低(可能是东北部

的巴丹吉林沙漠吞噬造成的),而 DFS 内部河道没有明显的改道、侧向迁移和截弯取直现象,说明 1973 年以来黑河 DFS 的边界和河床是稳定的,黑河 DFS 没有向前推进或横向扩张。然而,与稳定的边界和河床不同,DFS 内的河流水量和湖泊面积是不稳定的,具体表现为不同时期湖泊水体面积差距

较大(图 3),湖泊水体面积最小时(2002 年)仅为面积最大时(1990 年)的 26%。湖泊水体面积的变化不是湖盆扩张或收缩造成的,而是与气候和黑河径流量有关,如 2000 年前湖泊水体主要靠降水补给,水体面积较大,而 2000 年后降水量减少且蒸发较强^[30],湖泊萎缩甚至干涸,面积达到最小值。黑河统一调水后,黑河水先后进入东、西居延海^[19],湖泊水体逐渐恢复,水体面积与正义峡径流的变化趋势基本一致。

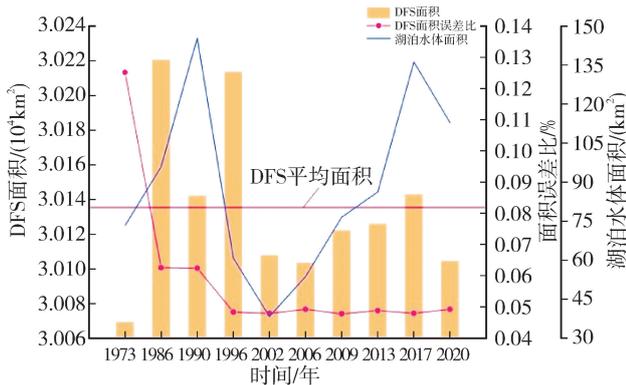


图 3 黑河 DFS 时间变化特征

Fig. 3 Temporal variation characteristics of Heihe DFS

3.2 分区地貌特征

为进一步研究黑河 DFS 的形成机制、地貌特征和水系分布,将研究区分为近端、中部和远端(图 4(a))。黑河自 DFS 端点至狼心山经历了低弯度曲流河向辫状河的转化,以狼心山为界,黑河分为东河和西河,在东河和西河的两侧出现了大量放射状的古河道,这些古河道使黑河 DFS 横向延伸且宽度增加。狼心山以南为 DFS 近端,狼心山以北为 DFS 中部。东河和西河在 950m 等高线以北各自形成汇入湖泊的放射状分流河道,中部发育的大部分古河道在 950m 等高线附近不再向北延伸,故以 950m 等高线划分 DFS 中部和 DFS 远端。

近端呈喇叭形,面积约 $0.517 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔 1 126.824m,平均坡度 0.974° 。黑河 DFS 在近端发生了曲流河向辫状河的转化,曲流河长约 12.76 km,弯度指数小于 2;辫状河长约 170.35 km,汊道发育,丰水期河水可没过心滩。近端发育中海拔河流阶地、中海拔洪积高平原等 14 种地貌类型,河流和洪水塑造了堆积地貌,在河流阶地上发育有已经干涸的古河道。风力起到了侵蚀和堆积作用,黑河干流西侧新月形沙丘说明近端区盛行西风,沙地的物源区可能是西侧的阿拉善戈壁,同时东侧的巴丹吉林沙漠可能会侵蚀近端。近端西侧乳白色沉积

物为盐湖平原,以西有冲沟和干枯河道汇入,在河西新湖周围有小面积的湖积平原,而河漫滩上发育的湖泊周围无明显湖积物痕迹(图 5(a))。

中部面积 $1.741 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔 999.534m,海拔跨度超过 400m,平均坡度约 0.947° 。中部主要地貌类型为冲积平原、洪积平原和沙地。黑河 DFS 在中部分成东河和西河,两河的夹角约 60° ,沉积物和水流的相互作用形成了与河流延伸方向一致的小型纵向沙坝,东河支流数量、河漫滩和河流阶地面积均小于西河。中部广阔的冲洪积平原上发育有众多放射状的曲流河或辫状河古河道,分流河道间有冲沟,由于风的堆积作用,古河道的边滩和心滩边界模糊。中部的西北部和东部存在已经干涸的中更新世湖泊,东南部存在已经干涸的全新世湖泊(古日乃湖),从遥感影像上很难识别古日乃湖的边界。现今古代湖泊基本被沙地覆盖,只在表面发育有冲沟和古河道。由于研究区盛行西风,因此中部沙地的物源来自东部巴丹吉林沙漠的可能性较小。中部南部的残丘相对高度大于西北部,与近端的基岩残丘类型一致(图 5(b))。

远端面积约 $0.720 \times 10^4 \text{ km}^2$,平均海拔 922.60 m,平均坡度 0.989° ,主要地貌类型有湖积冲积平原、湖积平原和湖积台地。全新世远端北部的众多黑河尾间湖泊曾是相连的大湖,西居延海、东居延海和古居延泽曾为相连的古大湖,最大湖泊面积可能超过 $6\,000 \text{ km}^2$,边界与 927 m 等高线相近。东河在远端发育了规模很大的分流河道,形成了额济纳绿洲,众多水上分流河道或汇入东居延海或自然消亡,分流河道间有湿地,靠近湖泊的三角洲平原亚相受湖泊和风改造。西河分流河道较少,心滩十分发育且分流河道周围植被稀疏,受风力侵蚀的痕迹较为明显。西居延海面积远大于东居延海,现今水量很小且湖水含盐,湖盆内可见泥裂,湖堤保存较好,湖盆周围亦存在面积较大的全新世湖积物。高水位期湖水淹没了部分放射状河道,扩大了湖积物覆盖范围,与河水共同塑造了冲积湖积平原等地貌。随着气候变干和上游来水量减少,大湖分裂为东居延海和西居延海等面积不等的湖泊,部分水下三角洲出露地表。随着水体继续减少,湖底干涸,甚至成为沙地。西居延海西南侧存在 5~6 个完全干涸的古代湖泊,北部有古河道入湖,发育小型三角洲。古居延泽周围,特别是其南部存在大片沙地,20~30m 分辨率的影像中新月形沙丘和沙丘链明显,沙地中古河道隐约可见(图 5(c))。

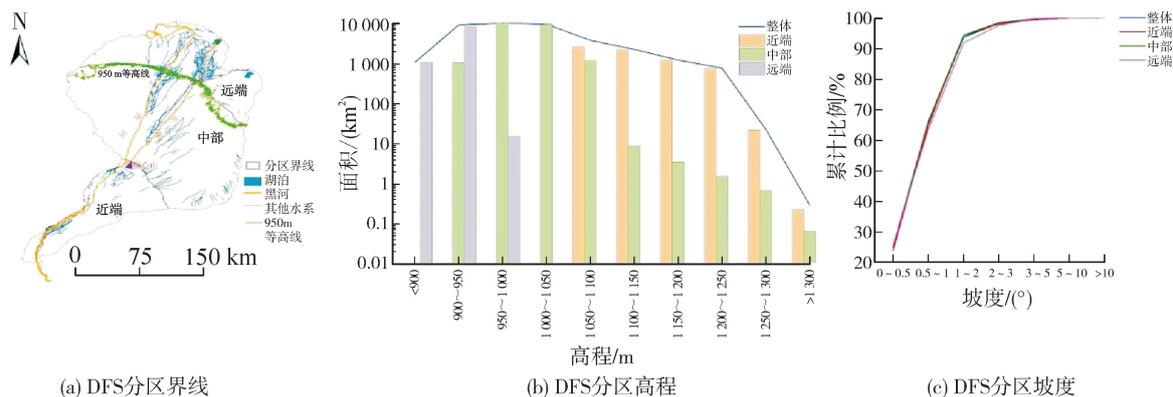


图 4 黑河 DFS 分区地貌特征

Fig. 4 Geomorphological characteristics of 3 zones in Heihe DFS

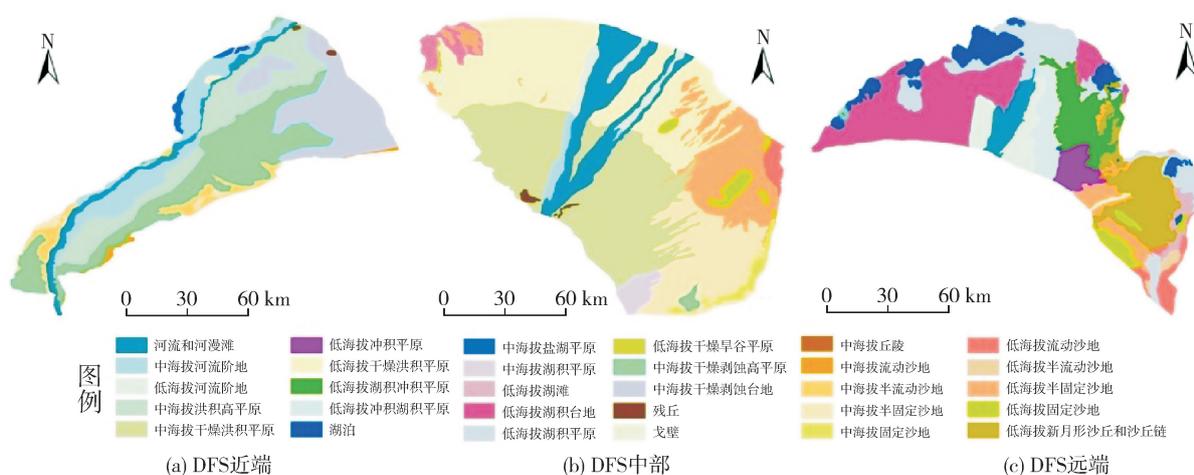


图 5 黑河 DFS 分区地貌类型

Fig. 5 Geomorphological types of 3 zones in Heihe DFS

近端、中部和远端均有流水、沙地和干燥剥蚀等 积,但地貌外营力和地貌类型具有较大差异(表 2)。地貌,地貌发育的环境较为干燥,有利于风积物堆

表 2 黑河 DFS 分区地貌特征及外营力

Tab. 2 Geomorphological characteristics and exogenic force of 3 zones in Heihe DFS

地貌类型	近端	中部	远端
河流	河流宽度最大,无放射状河道,河流阶地上有古河道	黑河干流分为东河、西河,中间和西侧发育放射状古河道	东河、西河入湖,分流河道发育,古河道规模缩小
湖泊	湖泊位于黑河干流沿岸,无已干涸的古代湖泊	东西、两侧存在干涸的古代湖泊,河流沿岸湖泊不发育	湖泊发育且历史上出现统一的古大湖
风成地貌	黑河干流以西和东部与巴丹吉林沙漠接壤处有连片沙丘	古代湖泊上覆盖沙地	沙地占比最高,古居延泽以南有连片沙丘
残丘	黑河干流东侧存在 2 个残丘,残丘表面有树枝状冲沟	5 个残丘聚集在 DFS 中部南端,中间有 1 个孤立残丘,湖积平原上残丘成片分布	不常见
主要地貌外营力	河流、洪水、风	河流、洪水、风、湖泊	河流、湖泊、风、洪水

近端干燥剥蚀地貌最为发育,固定和半固定沙地不发育;中部地貌外营力最丰富,冲积物和冲洪积物的覆盖范围最广,沙地类型丰富,残丘数量多;远端风积地貌和湖积地貌占比最大,出现如冲积湖积平原等多营力共同塑造的地貌,众多三角洲沉积亦受风力作用改造。分类统计研究区的高程和坡度数据(图4(b)和(c)),发现近端和远端的高程变化范围较小,而中部覆盖了900 m以上的所有类别;图4(c)中远端平均坡度最大,而中部平均坡度最小,说明湖积物和风积物覆盖区不及冲积物和冲洪积物覆盖区平缓。对比近端、中部和远端的地貌特征,可以确定自近端至远端,河流水动力逐渐减弱,但河道(包括古河道)的规模先扩张后缩小。近端、中部和远端可容纳空间大小为近端<远端<中部,沉积物供给量为近端>中部>远端,且三者之间可容纳空间之差大于沉积物供给量之差,因此自近端至远端,A/S值(可容纳空间/沉积物供给)先增加后减小。

4 黑河 DFS 控制因素和沉积模式

4.1 黑河 DFS 演化的控制因素

DFS的演化受控于流域、构造、气候以及在多种因素影响下的径流变化^[7]。流域特征决定了物源区沉积物的性质与总量、沉积物搬运的难易程度以及DFS形成过程中沉积物与汇水区基底的相互作用;构造塑造了流域盆地的形态,与盆地的可容纳空间直接相关,也影响着汇水区的形态和体积,同时改变河流在汇水区的动力条件和DFS的展布形状。物源区和汇水区的气候变化可能造成DFS形态改变,甚至导致DFS由加积状态变为侵蚀状态,如整个流域的干旱会促使DFS表面放射性河道废弃,抑制DFS的横向扩张,而气候波动带来的洪水发生频率和强弱变化也直接影响着DFS的横向发展。DFS形成后径流的变化影响着DFS的沉积方向、搬运距离和分选变化,进而逐渐改变DFS的几何形态。

黑河DFS的物源区为黑河干流的上游和中游(以下简称黑河上游、黑河中游)。黑河上游位于祁连山区,夷平面以下(图6(c))属于地貌演化的壮年期($0.35 < HI(\text{面积-高程积分值}^{\text{①}}) < 0.6$),河流侵蚀强烈;黑河中游位于河西走廊,属于地貌演化的老年期($HI < 0.35$),以堆积作用为主。整个黑河流域(包含黑河干流、山丹河、石油河等多条河流)的上游构造活动表现为西强东弱^[31],黑河上游位于整个黑河流域上游东侧,加之黑河上游和中游属于地质灾害的极微弱区,物源区构造活动对DFS影响较弱。

一般来说,当构造条件和物源供给一定时,物源区降水量与DFS的规模呈正相关。1950年至今,黑河上游平均年降水量超过400mm(图6(b)),略高于全新世中期以来的平均水平^[31](图6(c))。黑河中游年降水量在100~400mm之间,高于晚更新世最后冰期水平^[32]。1960年至今,黑河流域变暖趋势明显,暖季冰川消融带来的冰雪融水有利于沉积物搬运,进而促进DFS发育。黑河上游径流以降水补给和冰雪融水补给为主,1960—2014年,黑河上游年极端洪水总量增加^[33],但洪水从莺落峡(中游起点)传递到正义峡(中游终点)的过程中,洪峰衰减量可能超过径流补充量,削弱了上游洪水对DFS的影响^[34],且莺落峡多年平均径流量是正义峡的1.5倍,沉积物在搬运途中耗水量超过产水量。黑河上游降水侵蚀表土为黑河DFS带来了大量泥沙,莺落峡多年平均输沙量为 $193 \times 10^4 \text{ t}$,正义峡多年平均输沙量为 $138 \times 10^4 \text{ t}$,莺落峡的输沙模数是正义峡的5倍,说明黑河中游的产沙能力弱于上游,大量泥沙在地形平坦的中游淤积导致一部分泥沙损耗。

近端所在的金塔-鼎新盆地和中部、远端所在的额济纳盆地为DFS沉积提供了广阔的场所,且盆地边缘和内部的构造控制了黑河DFS的形态。近端东侧的长断裂抑制了近端向东扩张,近端西侧的前中生界地层隆起形成的小型断层限制了近端向西扩张。近端河流沿线的断层(图6)可能阻挡河流向东游荡从而造成河流偏向近端西侧。起点附近河流并未完全摆脱山体束缚,发育有与上游相似的曲流河,河流向下游不再有山体约束,干旱的气候和稀疏的植被有利于河流向辫状河转化,近端较小的河流宽度又降低了近端发育多条辫状河道或辫状河道自由迁移的可能性,河流表现为单一曲-辫转化。额济纳盆地边界的中型断层则控制了中部和远端的形态,其中东侧断层阻挡了一部分风沙向东运动,有利于风积物在DFS表面保存。在DFS内部,古日乃湖西侧的断裂与盆地边缘的断层共同控制了古代湖泊的形态,这条断裂既是湖积物覆盖区和冲洪积平原的边界,也可能是DFS横剖面没有呈上凸形的主要原因。DFS西北部斜穿中部和远端的长断裂可能是这一区域坡度和地表起伏度高于周围区域的原因,而DFS内部的几条与河流延伸方向接近平行的隆起或断裂^[35]一定程度上影响了横剖面的形态(图6(a))。如图6(a)所示的几条断裂和隆起均不明显,且没有观察到研究区内有其他明显断裂,整个

①面积-高程积分值由DEM数据计算。

DFS 又属于地质灾害的轻度发育区(图 6(c))和地貌活动的老年期($HI=0.27$),近几十年构造活动不强烈。

黑河 DFS 几乎是黑河流域最温暖的地区,但多年平均气温不超过 15°C (图 6(b))。黑河 DFS 多年平均降水量低于 100 mm ,降水量南高北低而蒸发量南低北高,南部蒸发量为 $2\ 000\sim 2\ 400\text{ mm}$,北部超过 $2\ 400\text{ mm}$,属于我国的干旱区。DFS 中部和远端所在的额济纳旗,起沙风集中在 $3\sim 6$ 月^[36],降水集中在 $7\sim 9$ 月,被吹起的颗粒不容易被降水打湿并回到地表。因此气候条件有利于黑河 DFS 的保存、风力作用对 DFS 的改造和风成沙地发育,抑制了 DFS 表面的化学风化和生物风化,却促进了物理风化。这种气候下,突发性强降水会对 DFS 产生重要影响,而远端土壤含水量 (8.4%) 略低于近端 (8.8%) 也是气候条件造成的。

当 DFS 径流突增时,洪水扩大冲洪积平原面积,造成河流改道和 DFS 几何形状与地貌类型改变,增进了河流沉积的复杂性,如中部大量干涸的放射状古河道说明第四纪黑河下游是频繁改道的。中

部和远端的东部,古河道流经区域颜色较周围深,而西部颜色变化不明显,表明上更新世河流和洪水运动并不是覆盖整个 DFS,西侧河流和洪水的活动范围可能更大。中部坡度变缓,产流减少,河流水力变弱,部分放射状的古河道变为曲流河,但在坡度较大的区域,辫状河仍可保持原有形态,因此中部的河流沉积具有复杂的放射状曲辫共存特征。远端河流水量继续减少,蒸发量和风力侵蚀增加,放射状河道在自然状态下容易萎缩甚至消亡,难以全部汇入终端湖泊,河流沉积出现萎缩曲辫共存的现象。目前,黑河流域的径流处在近 $2\ 000$ 年来的较低水平^[37],黑河 DFS 平均径流深度不足 5 mm ,狼心山下泄水量约为正义峡下泄水量的二分之一,近端径流损耗严重;狼心山以下几乎不产流且中部坡度减小,造成水力减弱,导致河流携带泥沙沉积的范围没有继续向前扩大,河流断流常见。加之黑河 DFS 地层富水程度较差,地下水不能很好地补给径流,DFS 内河流水量减弱会缩短泥沙搬运的距离,导致近端沉积物粒度变粗,使得近端、中部和远端的 A/S 值变化。

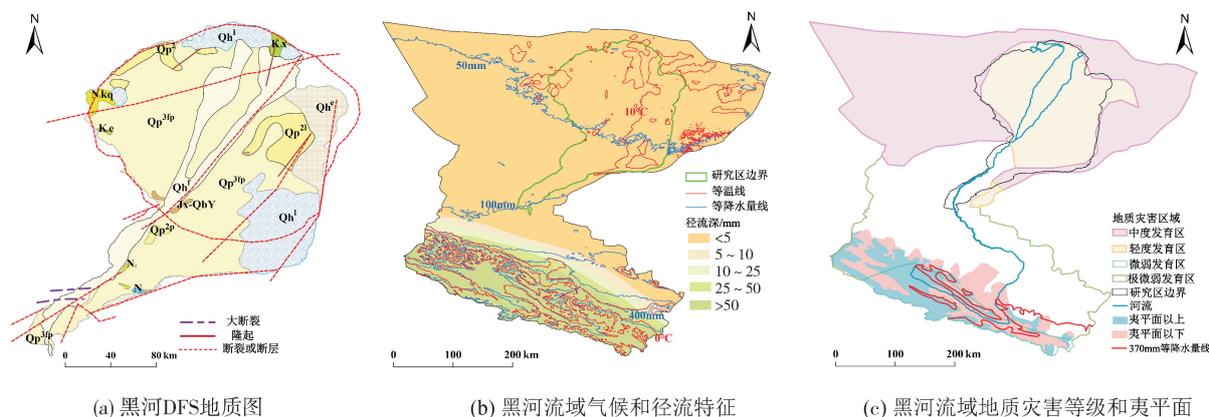


图 6 黑河 DFS 的控制因素

Fig. 6 Controlling factors of Heihe DFS

上述分析表明,黑河 DFS 物源区的构造活动对黑河 DFS 影响较弱,而气候和径流条件有利于 DFS 前积。其中黑河上游的气候和径流条件、中游的气候条件与整个物源区相一致,中游径流条件与整个物源区不一致。DFS 所在沉积盆地边缘和内部的构造控制了 DFS 的形态,DFS 内的气候和径流则不利于 DFS 扩张。若不考虑人类活动的影响^[38-40],构造控制了黑河 DFS 形态,气候和径流控制了黑河 DFS 演化。近五十年来黑河 DFS 保持稳定是稳定的构造、干旱的气候、水少沙多及分配不均的径流共同作用的结果。

4.2 黑河 DFS 沉积模式

黑河 DFS 形成于第四纪,是由河流和洪水搬运作用共同形成的,堆积的冲积物和冲洪积物形成了冲积平原和冲洪积平原,一部分冲洪积物经过了风的改造,发生物理风化或其表面有风积物覆盖。上更新统的冲洪积物形成的冲洪积平原其部分区域又经过干燥剥蚀作用,成为干燥剥蚀高原或台地。近一万年以来,黑河 DFS 以河流的搬运和沉积作用为主,东河、西河形成以后带来的冲积物塑造了河漫滩、河流阶地和冲积平原等地貌。在部分湖泊存在的区域,湖泊成为主要的地貌营力,湖泊干涸后部分

湖积物表面覆盖了全新世风积物,形成了各种类型的沙地。若以土壤质地近似替代表层沉积物粒度,存在冲积物<洪积物<风积物的现象,其结论与土壤中砾石含量一致。

黑河 DFS 最大半径为 310 km,高度差与半径之比为 0.001 5(约 0.087°),依据扇体规模和气候,确定黑河 DFS 是干旱气候下形成的巨型扇,并建立黑河 DFS 沉积模式(图 7);黑河 DFS 由近端、中部和远端三部分组成;近端(DFS 延伸长度的 50%)主体为受构造限制的冲积平原和冲洪积平原,主要沉积动力为河流和洪水;中部(DFS 延伸长度的 25%)主体为河流和洪水形成的冲积平原和冲洪积平原,主要沉积动力为河流、洪水、湖泊和风;远端(DFS 延伸长度的 25%)主体为 DFS 终端湖泊以及河流、洪水、湖泊堆积作用形成的泛滥平原、台地,主要沉积动力为河流、湖泊、风和洪水。DFS 自近端至远端,A/S 值先增加后减少,反映了 DFS 所在沉积盆地的空间形态和 DFS 沉积物的供给量变化。DFS 顺物源方向的河流转化模式依次为单一曲-辫转化、复杂放射状曲辫共存和萎缩的放射状曲辫共存,这也是 DFS 内河流水动力逐渐减弱的体现。

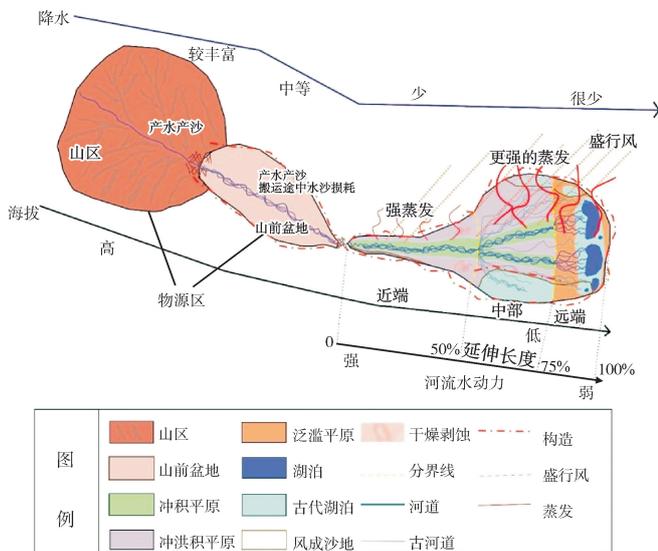


图 7 黑河 DFS 的沉积模式

Fig. 7 Sedimentary model of Heihe DFS

5 结论

1) 黑河 DFS 面积约 $3.01 \times 10^4 \text{ km}^2$,最大半径超过 300 km,扇顶角约 71.02° ,平均高程约 1 004 m,平均坡度为 0.96° ,平均地表起伏度 2.73。高程纵剖面呈直线形,横剖面呈中西部上凸形和东部下凹形,近五十年来黑河 DFS 的边界、河道位置和冲积物覆盖区范围变化不大。

2) 根据地貌、沉积和水系等特征,将黑河 DFS 划分为近端、中部、远端 3 部分和 30 种地貌类型。DFS 宏观地貌的发育环境较为干燥,有利于风积地貌保存,平均海拔近端>中部>远端,平均坡度近端>远端>中部。近端、中部和远端均发育有河漫滩和河流阶地,中部干燥剥蚀地貌面积最大、冲洪积平原范围最广和沙地类型最丰富,远端风积地貌、湖积地貌占比最高,而单纯的冲积和冲洪积平原占比降低。

3) 黑河 DFS 形态受构造约束,物源区和 DFS 内的气候、径流条件是 DFS 演化的主要控制因素,近五十年来,黑河 DFS 保持稳定是构造、气候、径流共同作用的结果。

4) 黑河 DFS 是第四纪干旱气候下形成的巨型扇;主要沉积动力为河流、洪水、湖泊和风;近端和中部主体为冲积平原和冲洪积平原,远端主体为泛滥平原和 DFS 终端湖泊;顺物源方向河流沉积模式依次为单一曲-辫转化、复杂放射状曲辫共存和萎缩的放射状曲辫共存。

参考文献:

- [1] WEISSMANN G S, HARTLEY A L, NICHOLS G J, et al. Fluvial form in modern continental sedimentary basins: distributive fluvial systems[J]. *Geology*, 2010, 38(1): 39-42.
- [2] 吴胜和,冯文杰,印森林,等. 冲积扇沉积构型研究进展[J]. *古地理学报*, 2016, 18(4): 497-512.
WU Shenghe, FENG Wenjie, YIN Senlin, et al. Research advances in alluvial fan depositional architecture [J]. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 2016, 18(4): 497-512.
- [3] BEN M, OWEN A, NICHOLS G J, et al. Quantifying downstream, vertical and lateral variation in fluvial deposits: implications from the Huesca distributive fluvial system[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 8: 1-19.
- [4] 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.
- [5] DAVIDSON S K, HARTLEY A J, WEISSMANN G S, et al. Geomorphic elements on modern distributive fluvial systems[J]. *Geomorphology*, 2013, 180-181: 82-95.
- [6] 张昌民,胡威,朱锐,等. 分支河流体系的概念及其对油气勘探开发的意义[J]. *岩性油气藏*, 2017, 29(3): 1-9.
ZHANG Changmin, HU Wei, ZHU Rui, et al. Concept of distributive fluvial system and its significance to oil and gas exploration and development[J]. *Lithologic Reservoirs*, 2017, 29(3): 1-9.
- [7] 吕峻岭,朱一杰,夏瑞,等. 干旱型分支河流体系沉积特

- 征与演化过程——水槽沉积模拟实验研究[J]. 沉积学报, 2020, 38(5): 994-1005.
- LÜ Junling, ZHU Yijie, XIA Rui, et al. Sedimentary characteristics and evolution process of arid distributive fluvial systems: insights from a flume-tank experiment [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2020, 38(5): 994-1005.
- [8] 赵芸,张昌民,朱锐,等. 分支河流体系(DFS)研究进展[J]. 大庆石油地质与开发,2021,40(6):1-11.
- ZHAO Yun, ZHANG Changmin, ZHU Rui, et al. Research progress of the distributive fluvial system(DFS) [J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2021, 40(6):1-11.
- [9] 李琼,王姣姣,潘保田. 构造和降水对祁连山北麓冲积扇演化影响的数值模拟研究[J]. 地球科学进展, 2020, 35(6): 607-617.
- LI Qiong, WANG Jiaojiao, PAN Baotian. Numerical simulation of the influence of tectonics and precipitation on the evolution of alluvial fans at the northern foot of Qilian Mountains[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(6): 607-617.
- [10] ZHANG Xianghui, ZHANG Changmin, FENG Wenjie, et al. Sedimentary characteristics of distributive fluvial system in arid area: a case study of the Shule River distributive fluvial system, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2021, 48(4): 877-888.
- [11] MISHRA K, SINHA R. Flood risk assessment in the Kosi megafan using multi-criteria decision analysis: a hydro-geomorphic approach [J]. *Geomorphology*, 2020, 350:1-19.
- [12] OLIVEIRA JUNIOR J C, FURQUIM S A C, NASCIMENTO A F, et al. Salt-affected soils on elevated landforms of an alluvial megafan, northern Pantanal, Brazil [J]. *Catena*, 2019, 172: 819-830
- [13] BELEN T M, KROHLING D M, BRUNETTO E. The geomorphology and late quaternary sedimentary record of the Salado/Juramento fluvial megafan, central Andes foreland basin (Chaco Plain, Argentina) [J]. *Geomorphology*, 2021, 373: 107495.
- [14] 张金亮. 曲流河扇相模式及应用[J]. 地质论评,2022, 68(2):408-430.
- ZHANG Jinliang. The facies model of a meandering fluvial fan and its application[J]. *Geological Review*, 2022, 68(2): 408-430.
- [15] 冯绳武. 河西黑河(弱水)水系的变迁[J]. 地理研究, 1988,7(1):18-26.
- FENG Shengwu. The changes of Hei River(Ruoshui) system in Hexi [J]. *Geographical Research*, 1988, 7(1): 18-26.
- [16] 景爱. 额济纳河下游环境变迁的考察[J]. 中国历史地理论丛,1994(1):41-62.
- [17] 刘浏,刘丽丽,索滢. 近 53 a 黑河流域水文气象要素时空演变特征[J]. 干旱区研究,2017,34(3):465-478.
- LIU Liu, LIU Lili, SUO Ying. Spatiotemporal evolution of hydro-meteorological variables in the Heihe River basin in recent 53 years [J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3):465-478.
- [18] 马燕,曹希强,李志萍. 黑河下游额济纳地区环境演变及其驱动机制[J]. 气象与环境科学,2008,31(3): 43-47.
- MA Yan, CAO Xiqiang, LI Zhiping. Environment changes and its dynamic mechanism of Ejina region in the lower reaches of Heihe River[J]. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2008, 31(3): 43-47.
- [19] 董国涛,廉耀康,范正军,等. 黑河生态调水后额济纳绿洲植被变化规律研究[J]. 人民黄河,2019,41(7):5-9.
- DONG Guotao, LIAN Yaokang, FAN Zhengjun, et al. Vegetation changes of Ejina oasis in the lower reaches of Heihe River before and after ecological scheduling for water resources[J]. *Yellow River*, 2019, 41(7): 5-9.
- [20] 汪桂生,颀耀文,王学强,等. 明代以前黑河流域耕地面积重建[J]. 资源科学,2013,35(2):362-369.
- WANG Guisheng, JIE Yaowen, WANG Xueqiang, et al. Data reconstruction of Heihe River basin cultivated land area prior to the Ming dynasty[J]. *Resources Science*, 2013, 35(2): 362-369.
- [21] 曹宇,欧阳华,肖笃宁,等. 额济纳天然绿洲景观变化及其生态环境效应[J]. 地理研究,2005,24(1):130-139,164.
- CAO Yu, OUYANG Hua, XIAO Duning, et al. Landscape change and its eco-environmental effects in Ejina natural oasis[J]. *Geographical Research*, 2005, 24(1):130-139,164.
- [22] 谢轲,尹辉. 内蒙古额济纳盆地沉积物粒度特征及沉积环境[J]. 中国沙漠,2021,41(6):111-119.
- XIE Ke, YIN Hui. The characteristic of grain-size in Ejina Basin and associated sedimentary dynamic environmental analysis[J]. *Journal of Dessert Research*, 2021,41(6): 111-119.
- [23] ZHANG Yuanfu, DAI Xin, WANG Min, et al. The concept, characteristics and significance of fluvial fans [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 1014-1026.
- [24] 刘宗堡,张云峰,刘云燕,等. 末端扇沉积体系研究现状及石油地质意义[J]. 中国矿业大学学报,2018,47(3):520-530, 537.
- LIU Zongbao, ZHANG Yunfeng, LIU Yunyan, et al. Status quo of the terminal fan sedimentary system study and its petroleum geological significance [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*,

- 2018, 47(3): 520-530, 537.
- [25] 连运涛. 黑河流域水沙输移特性的影响研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2018: 9-12.
LIAN Yuntao. Research on the influence of characteristics of water and sediment transport in Heihe River [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2018: 9-12.
- [26] 王钧, 蒙吉军. 黑河流域近60年来径流量变化及影响因素[J]. 地理科学, 2008, 28(1): 83-88.
WANG Jun, MENG Jijun. Characteristics and tendencies of annual runoff variations in the Heihe River basin during the past 60 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(1): 83-88.
- [27] 王录仓, 张晓玉. 黑河流域近期气候变化对水资源的影响分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(4): 60-65.
WANG Lucang, ZHANG Xiaoyu. Effect of the recent climate change on water resource in Heihe River basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(4): 60-65.
- [28] 王鸿斌, 贾博文, 王叶堂, 等. 1973-2018年疏勒南山冰川变化[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(6): 60-65.
WANG Hongbin, JIA Bowen, WANG Yetang, et al. Glacier changes in Shulenan Mountain from 1973 to 2018[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(6): 60-65.
- [29] 刘警阳, 刘宗堡, 曹兰柱, 等. 松花江干流中下游河型转化控制因素研究[J/OL]. 沉积学报: 1-17 [2022-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1038.P.20210824.0907.002.html>.
LIU Jingyang, LIU Zongbao, CAO Lanzhu, et al. Influences affecting river pattern transformation in the middle and lower reaches of main stream, Songhua River [J/OL]. Acta Sedimentologica Sinica: 1-17 [2022-04-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1038.P.20210824.0907.002.html>.
- [30] 魏学占, 吴瑞芬. 额济纳旗近47年气候变化特征分析[J]. 内蒙古气象, 2008(6): 5-7.
- [31] 苏琦, 袁道阳, 谢虹. 祁连山—河西走廊黑河流域地貌特征及其构造意义[J]. 地震地质, 2016, 38(3): 560-581.
SU Qi, YUAN Daoyang, XIE Hong. Geomorphic features of the Heihe River drainage basin in western Qilian Shan-Hexi corridor and its tectonic implications [J]. Seismology and Geology, 2016, 38(3): 560-581.
- [32] 张兰生. 我国晚更新世最后冰期气候复原[J]. 北京师范大学学报: 自然科学版, 1980(1): 101-118.
ZHANG Lansheng. Reconstruction of the climate of late Pleistocene ice age in China[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1980(1): 101-118.
- [33] 程文举, 席海洋, 张经天. 黑河上游径流对极端气候变化的响应研究[J]. 高原气象, 2020, 39(1): 120-129.
CHENG Wenju, XI Haiyang, ZHANG Jingtian. Response of runoff to extreme climate change in the upper reaches of the Heihe River[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(1): 120-129.
- [34] 崔涛, 赵映东. 黑河流域“96·8”洪水分析[J]. 水文, 2000, 20(3): 63-64.
CUI Tao, ZHAO Yingdong. Analysis of the “96·8” Flood in the Heihe River Basin [J]. Hydrology, 2000, 20(3): 63-64.
- [35] 周爱国. 中国西北干旱区额济纳盆地地质生态学研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2004: 21-30.
ZHOU Aiguo. Geocology of the Ejina basin in northwestern arid region, P. R. China [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2004: 21-30.
- [36] 李盼盼. 基于灌丛沙丘记录的黑河下游近300年的气候环境变化[D]. 兰州: 兰州大学, 2017: 26-28.
LI Panpan. Climatic and environmental variations in recent 300 years indicated by the records in the sediment of Tamarix Ramosissima Dunes in lower reaches of Heihe River [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2017: 26-28.
- [37] SAKAI A, INOUE M, FUJITA K, et al. Variations in discharge from the Qilian Mountains, northwest China, and its effect on the agricultural communities of the Heihe Basin, over the last two millennia[J]. Water History, 2012, 4(2): 177-196.
- [38] 廖杰, 王涛, 薛娴. 黑河调水以来额济纳盆地湖泊蒸发量[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 228-232.
LIAO Jie, WANG Tao, XUE Xian. Lake's evaporation in the Ejina basin since transferring water from the Heihe River [J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 228-232.
- [39] 李培都, 司建华, 冯起, 等. 近70 a黑河径流量周期特征变化规律[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2018, 54(1): 32-38.
LI Peidu, SI Jianhua, FENG Qi, et al. Variation regularity of periodic characteristics of runoff in Heihe River in the last 70 years[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences), 2018, 54(1): 32-38.
- [40] 连运涛, 王昱, 郑健, 等. 黑河流域上游水沙输移趋势及其成因分析[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(3): 98-104.
LIAN Yuntao, WANG Yu, ZHENG Jian, et al. The trend of runoff and sediment transport in the upper reaches of Heihe basin and its cause analysis[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2019, 33(3): 98-104.

(责任编辑 周 蓓)