

梁爱民,董治宝,张正偲,等.沙漠倒置河床研究进展及其对火星类似物研究的启示[J].中国沙漠,2022,42(5):14-24.

沙漠倒置河床研究进展及其对火星类似物研究的启示

梁爱民¹,董治宝¹,张正偲²,苏志珠³,李超¹,张智¹,吕萍¹

(1.陕西师范大学 行星风沙科学研究所/地理科学与旅游学院,陕西 西安 710119; 2.中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室,甘肃 兰州 730000; 3.山西大学 历史文化学院,山西 太原 030006)

摘要:沙漠倒置河床是干旱区一种特殊的河流状正地貌,这种地形倒置现象蕴含着河床由负转正的重要环境变化信息。本文遵循地貌学思路,基于全球范围内对沙漠倒置河床的研究报道以及野外勘察工作,对该地貌的空间分布、形态特征、物质组成、沉积结构以及形成机制进行了详细梳理。总体而言,世界各大主要沙漠地区均发育该地貌类型,其表层多为岩石碎屑或胶结物硬层,下伏质地相对松软的砂、黏土物质,由于河床和河岸周边沉积物的差异化侵蚀,河床被相对抬高。基于此,对火星倒置河床的成因机制、物质组成和形成时间进行了讨论。尽管对地球上沙漠倒置河床的研究已经取得一定进展,但未来研究仍需对其形成年代及其代表的气候意义进行深入分析;同时还应更多地与不同类型的火星倒置河床进行类比研究,这将对揭示火星水文活动和环境变化等科学问题提供重要依据。

关键词:倒置河床;沙漠;火星;成因机制

文章编号: 1000-694X(2022)05-014-11

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2022.00004

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

倒置河床(Inverted Channels)是一种地形高出周边地表的河流状正地貌(图1),国内多称其为“砂砾碛”或“砾石体”^[1-2],因其形态独特而被众多学者关注。根据河道填充物的沉积原因,常见的倒置河床可分为:①冰川活动成因型:例如蛇形丘^[3],以及冰面湖上的冲积碎屑在湖冰消退后形成的倒置河床^[4];②火山活动成因型:熔岩流进入河道、沟谷,周边抗蚀能力弱的地形遭受侵蚀而形成的倒置河床^[5];③冲洪积成因型:古水系携带的粗颗粒沉积在河床,周边河岸被侵蚀致使河床相对抬高形成的倒置河床^[6]。其中,冲洪积成因型倒置河床多出现在沙漠地区(统称沙漠倒置河床),蕴含了沙漠地区由大范围降水转为极度干旱的环境变化信息。这种特殊的风沙地貌类型可以作为区域气候波动的有效地貌表征。

关于倒置河床的报道,可追溯到19世纪中后期^[7-8]。关于沙漠地区倒置河床的报道最早出现在20世纪上半叶,地质学家在中国罗布泊地区发现了雅丹地貌,并将其误认为是古河道遭风蚀后形成的倒置地形^[9]。直到1937年,由Miller^[10]在阿拉伯沙漠地区首次报道了河流状的倒置地形,并将其称为“悬浮的水系”(suspended drainage)。随后,研究者们陆续在撒哈拉沙漠^[11]、纳米布沙漠^[12]、阿塔卡玛沙漠^[13]、塔尔沙漠^[14]、柴达木沙漠^[15]、库姆塔格沙漠^[1,16-17]等全球范围内的沙漠发现了这种地貌,并对其成因进行了初步探讨。这些沙漠环境中的倒置河床因其地形由负转正,忠实地记录了沙漠地区由流水沉积作用转换为侵蚀作用(水蚀和风蚀)的环境变化信息,可用于指示干旱环境背景下的气候波动^[11,18-20]。近年来,随着火星环绕飞行器、着陆器和巡视器传回的高清影像增多,人们发现在火星这一“沙漠星球”上同样

收稿日期:2022-01-08; 改回日期:2022-01-27

资助项目:国家自然科学基金项目(41930641,41871008);中央高校基本科研业务费专项资金项目(GK202103144)

作者简介:梁爱民(1991—),男,湖北宜昌人,博士,主要从事干旱区环境演变与行星风沙地貌研究。E-mail: aimliang@snnu.edu.cn

通信作者:董治宝(E-mail: zbdong@snnu.edu.cn)

大规模存在与地球上极为相似的倒置河床地貌(图 1)^[21-23]。这一发现进一步激发了人们的研究兴趣,主要原因在于火星倒置河床地貌不仅是火星曾经存在大量地表水的直接证据,更是火星环境变化导致地形倒置的地貌记录^[24-25]。地球上的沙漠与现代火星地表环境最为相似,发育倒置河床的地表均有明显的风成痕迹(例如沙波纹,图 1)。因此地球沙漠倒置河床是对火星与地球进行类比研究的理想对象,对探索火星气候变化和宜居性具有重要的研究价值。

本文以地貌学思路为指导,基于全球范围内对沙漠倒置河床的研究报道以及野外考察工作,系统整理和分析了沙漠倒置河床的空间分布、形态特征、物质组成、沉积结构以及形成机制等内容,并在此基础上讨论了其对火星倒置河床成因机制、物质组成、沉积结构和形成时间的启示。本文力图通过探究地球上倒置河床的形成演化过程,为认识火星地表液态水活动如何产生并逐渐消亡这一重要的科学问题提供线索。

1 空间分布

根据文献、野外考察和高清影像调查结果,对全球沙漠倒置河床的分布进行了整理(图 2)。在全球 21 处沙漠中累计发现 47 处倒置河床,其中,分布在亚洲 16 处,非洲 18 处,北美洲 7 处,南美洲 2 处,大洋洲 4 处。从空间分布上看,撒哈拉沙漠的倒置河床报道最多,北美洲次之。中国境内虽有大量分

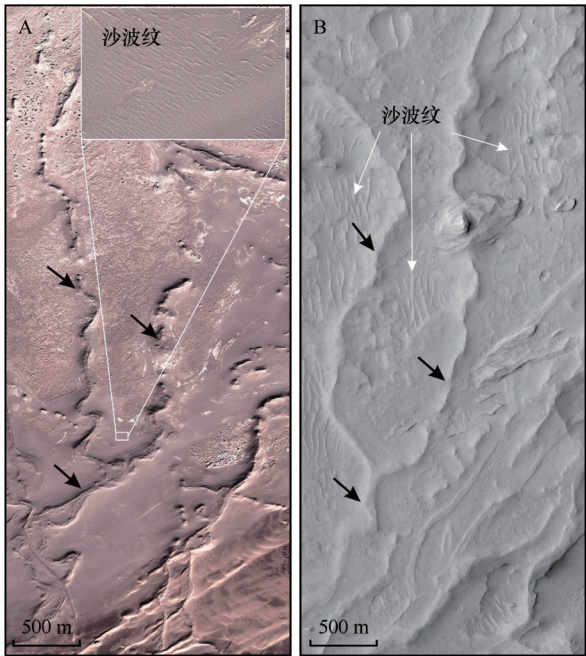


图 1 库姆塔格沙漠北缘(A,图源 Google Earth)和火星奥伊利亚桌山(Aeolis mensae)北缘(B,图源 NASA)倒置河床
Fig.1 Inverted channels. A: Northern edge of the Kumtagh Desert (image credit: Google Earth). B: Northern edge of the Aeolis mensae on Mars (image credit: NASA)

布,但一直被忽视,仅在库姆塔格沙漠和柴达木沙漠有零星报道^[1,6,15-17]。沙漠倒置河床多发育在山前倾斜冲洪积平原之上,例如阿尔金山冲洪积平原^[6]、安第斯山冲洪积平原^[13]、东昆仑山冲洪积平原^[15]、尼罗河冲洪积平原^[26]等。由此可见,沙漠倒置河床的形成发育与冲洪积作用密切相关。

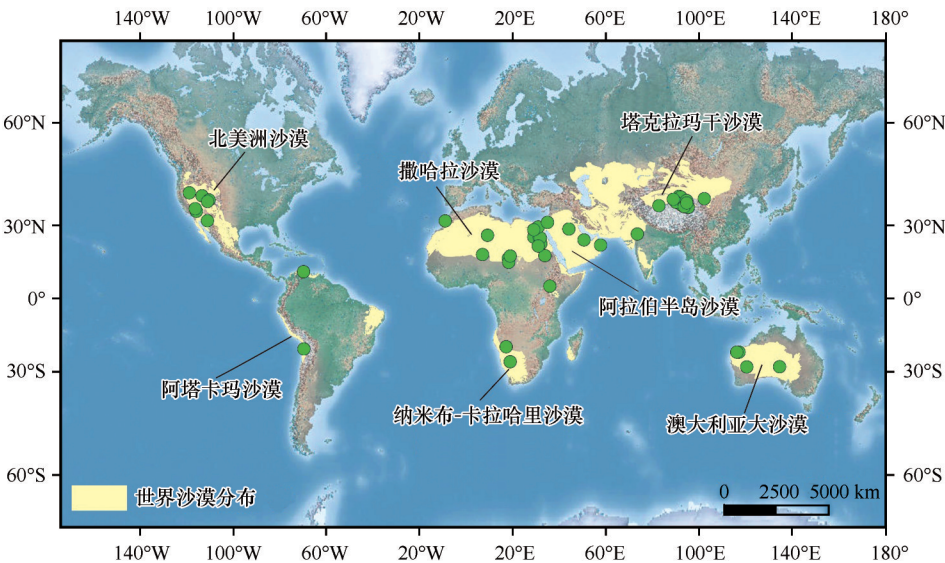


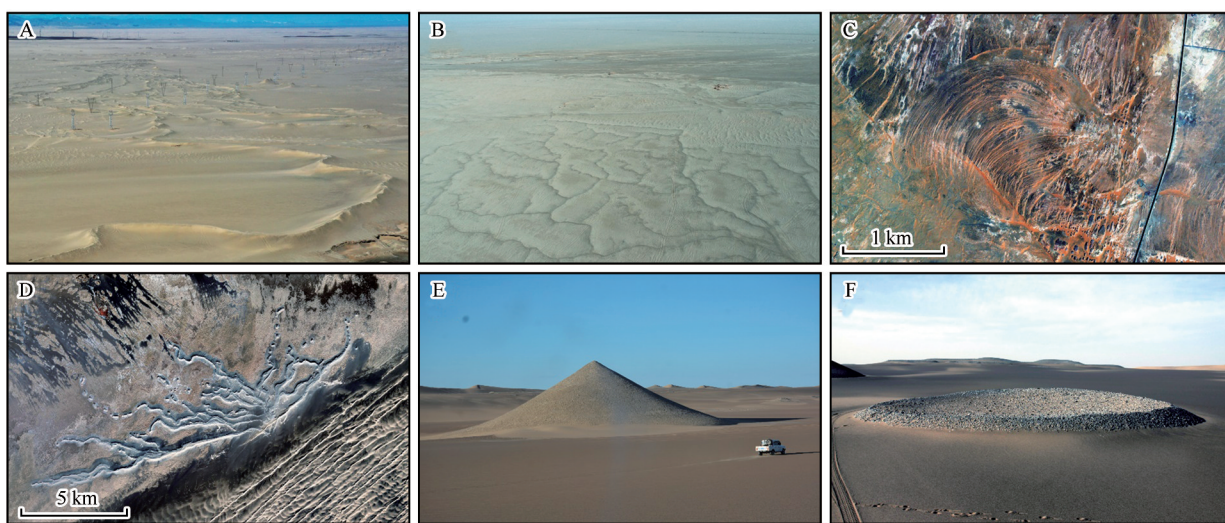
图 2 沙漠倒置河床全球分布(详细信息见表 1)

Fig.2 Global distribution of the desert inverted channels (detailed information can be found in table 1)

2 形态特征

形态特征是判断这种倒置地貌为古河床遗迹的重要标准。沙漠倒置河床的平面形态基本保留了其原始水系的空间格局,呈现曲线状^[15,26]、树枝状^[50]和扇状^[17-18]等(图3A、B、C、D)。其长度一般从数十米至数十千米不等,也有个别长度可达200 km(例如在澳大利亚南部^[36]),但这些河床并非如现代河流一样连续延伸,而是呈出间断性的连接。其宽度数米至数十米,通常情况下,由于倒置河床后期受到侵蚀(风蚀和水蚀)和重力崩塌,该宽

度已不是原始河道的宽度,但在重建古水系流量上仍具有重要的参考价值^[15,25]。其高度因侵蚀速率和基底物质组成差异而表现不同,一般为数米至数十米。为定量研究倒置河床的形态特征,研究者引入了河流地貌的形态参数对其进行表征,例如曲流波长、曲流振幅、曲率半径、弯曲系数等^[54]。正是基于这些直观的形态学特征,才得以将地球与火星上的倒置河床进行类比研究^[27]。此外,由于倒置河床受到差异侵蚀和下伏地形影响,在其局部还会形成特殊的锥状和环状,这些在中国的库姆塔格沙漠十分常见^[1](图3E、F)。



A: 曲线状(柴达木沙漠^[15]); B: 树枝状(塔克拉玛干沙漠米兰遗址附近); C: 滩状(撒哈拉沙漠东部达赫莱绿洲附近, 图源 Google Earth); D: 扇状(库姆塔格沙漠北部, 图源 Google Earth); E: 锥状(库姆塔格沙漠); F: 环状(库姆塔格沙漠^[1])

图3 沙漠倒置河床的形态

Fig.3 Morphology of the desert inverted channels

3 物质组成与沉积结构

地貌体的沉积物组成和沉积结构在很大程度上蕴含了其形成机制的信息。从目前的报道来看,沙漠倒置河床表层所覆盖的物质大部分为颗粒较粗的冲洪积物,较小部分为沙物质和粉砂黏土物质胶结体(表1)。其中,冲洪积物大部分为分选较差、棱角分明的岩屑,反映高能的水动力沉积环境和较短的搬运距离;亦有部分(例如尼罗河冲洪积平原上的倒置河床^[11])为分选和磨圆较好的鹅卵石,反映较长的搬运距离。根据这些物质的松散程度和颗粒粗细程度可以划分为两大类(图4):①胶结硬壳层(duricrust-capped),通常由富含硅、铁、碳酸钙、石膏等矿物的水溶液渗入沉积物颗粒空隙中并结晶,分别形成硅质、铁质、钙质、石膏质胶结物^[55],这

类胶结物既有碎屑类粗颗粒又有砂和黏土类细颗粒^[11,18,52];②松散碎屑层(clast-capped),由冲洪积过程携带的砾石和巨砾堆积在河道,这类物质的沉积通常指示较大的(甚至是灾难性的)洪水或泥石流事件^[19]。

沉积结构是沉积过程的记录,因此,对沙漠倒置河床沉积结构的解析可以推断其形成过程及其环境控制因素。例如, Matter等^[20]在阿拉伯半岛代赫纳沙漠发现倒置河床贯穿于沙漠之上,其表层覆盖砾石并夹杂螺壳化石,通过年代学和生物标识分析发现该河道为全新世大暖期时阿西尔山脉高强度的降雨形成。通过沙漠倒置河床的沉积结构来反演沉积过程和形成机制的案例在撒哈拉沙漠^[18]、柴达木沙漠^[15]、科罗拉多沙漠^[30]、莫哈韦沙漠^[33]等均有报道。沙漠倒置河床之所以能够保存下来,得

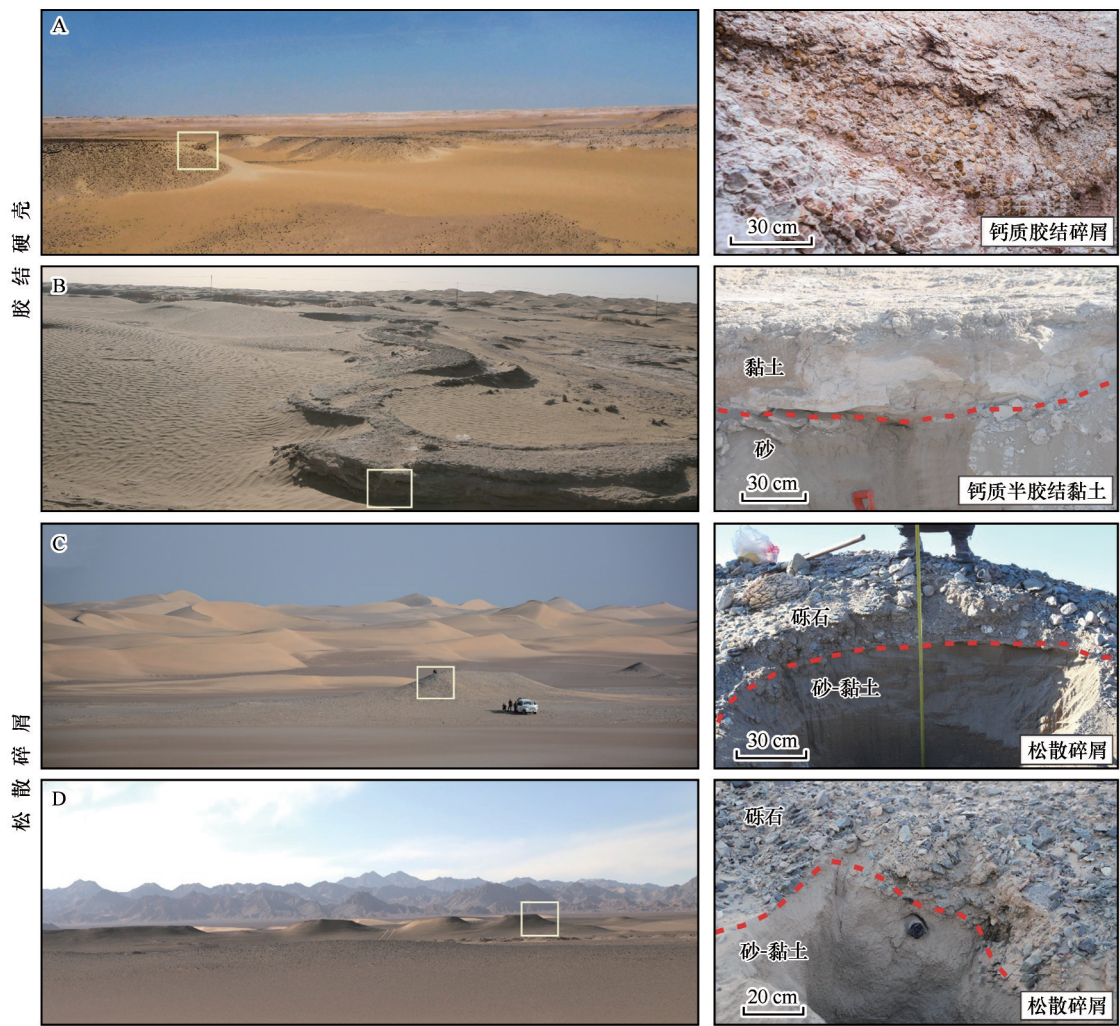
表 1 世界各地沙漠倒置河床类型与物质组成

Table 1 The types and composition of desert inverted channels around the world

地区	纬度	经度	沙漠	倒置类型	物质组成	来源
北美洲	41.21551°N	118.737°W	大盆地沙漠	景观倒置	—	文献[27]
	40.26372°N	113.239°W	大盆地沙漠	景观倒置	细砾和粗砂胶结物	文献[28]
	38.88792°N	110.287°W	科罗拉多沙漠	沉积倒置	交错层状砂岩	文献[21, 29–31]
	38.40475°N	110.874°W	科罗拉多沙漠	沉积倒置	铁质胶结砂岩(细砂–中砂)	文献[32]
	35.01994°N	115.729°W	莫哈韦沙漠	景观倒置	胶结的粗砾石,下伏风成沙和洪积物	文献[33]
	35.91639°N	116.218°W	莫哈韦沙漠	景观倒置	钙质胶结粗颗粒	文献[34]
	31.6175°N	110.953°W	索诺拉沙漠	景观倒置	砾石	文献[35]
大洋洲	28.0305°S	134.6896°E	澳大利亚大沙漠	景观倒置	硅质和铁质胶结的河流相砾岩	文献[36]
	22.344°S	117.2358°E	澳大利亚大沙漠	景观倒置	硅质、铁质和钙质胶结的砾岩	文献[37–38]
	22.3511°S	116.3342°E	澳大利亚大沙漠	景观倒置	硅质、铁质和钙质胶结的砾岩	文献[39]
	28.0923°S	120.5453°E	澳大利亚大沙漠	景观倒置	铁质胶结的洪积砾石	文献[5]
非洲	26.0939°S	19.00056°E	卡拉哈里沙漠	景观倒置	钙质胶结河流沉积物	文献[40]
	5.296389°N	36.0375°E	肯尼亚沙地	景观倒置	砾石、沙子和黏土	文献[41]
	20.246°S	17.28138°E	纳米布沙漠	景观倒置	松散沙物质和粗砾石	文献[42]
	16.97917°N	18.25222°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	钙质、硅质胶结砂砾	文献[43]
	27.53861°N	29.43694°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	细砂、粗砂和鹅卵石	文献[18]
	25.45755°N	29.17218°E	撒哈拉沙漠	沉积倒置	极细砂至粗砂砂岩	文献[18, 44]
	18.07889°N	33.90306°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	铁质胶结砂、砾和鹅卵石	文献[45]
	22.94472°N	32.13528°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	钙质、硅质和铁质胶结的砂、砾、鹅卵石和巨砾	文献[18, 26, 46]
	26.17223°N	9.302297°E	撒哈拉沙漠	沉积倒置	薄层状河流沉积物和交错层理状风成沉积物	文献[47]
	31.5543°N	8.84704°W	撒哈拉沙漠	沉积倒置	粉砂和贝壳	文献[48]
	25.33806°N	31.4575°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	细砂和鹅卵石	文献[18]
	25.16722°N	31.93639°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	细砂至粗砂和鹅卵石	文献[18]
	29.29917°N	31.085°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	河流冲积物	文献[18]
	15.39111°N	18.38167°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	铁质胶结砂砾	文献[49]
	18.56573°N	7.134322°E	撒哈拉沙漠	沉积倒置	具有交错层理的砂岩	文献[50]
	17.95083°N	19.01083°E	撒哈拉沙漠	—	—	文献[51]
	21.93389°N	31.07806°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	钙质、硅质和铁质胶结的砂(细砂至粗砂)、砾石、鹅卵石和巨砾	文献[46]
	28.3075°N	29.185°E	撒哈拉沙漠	景观倒置	直径 30—65 cm 的巨砾	文献[18]
南美洲	21.1164°S	69.5741°W	阿塔卡玛沙漠	景观倒置	部分为胶结的砾石,部分为松散的砾石	文献[13]
	11.43318°N	69.6681°W	委内瑞拉沙地	景观倒置	砂质黏土	文献[52]
亚洲	24.37972°N	50.69525°E	代赫纳沙漠	景观倒置	钙质胶结砂砾岩	文献[20]
	40.09613°N	91.51163°E	库姆塔格沙漠	景观倒置	砾石下伏风成沙、粉砂黏土	文献[6,16–17]
	37.08716°N	92.75998°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏风成沙、冲积物	文献[15]
	39.8584°N	92.26318°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏粉砂黏土	本文;野外考察与谷歌影像
	38.0484°N	90.28564°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏粉砂黏土	本文;野外考察与谷歌影像

续表1

地区	纬度	经度	沙漠	倒置类型	物质组成	来源
亚洲	36.37264°N	95.48132°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏粉砂黏土	本文:野外考察与谷歌影像
	36.65228°N	93.72419°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏粉砂黏土	本文:野外考察与谷歌影像
	38.7187°N	94.72055°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏粉砂黏土	本文:野外考察与谷歌影像
	37.86302°N	94.81932°E	柴达木沙漠	景观倒置	砾石下伏粉砂黏土	本文:野外考察与谷歌影像
	39.09485°N	89.0799°E	塔克拉玛干沙漠	景观倒置	磨圆较好的砾石下伏冲洪积沙物质	本文:野外考察与谷歌影像
	36.94153°N	82.88361°E	塔克拉玛干沙漠	景观倒置	砾石下伏交错层理的胶结风成沙	本文:野外考察与谷歌影像
	39.30247°N	102.3278°E	巴丹吉林沙漠	景观倒置	砾石	本文:野外考察与谷歌影像
	28.56861°N	44.22251°E	内夫得沙漠	景观倒置	石膏质、钙质胶结冲积物	文献[10]
	31.03354°N	34.98778°E	内盖夫沙漠	景观倒置	—	文献[53]
	26.62657°N	73.60133°E	塔尔沙漠	景观倒置	铁质胶结砾石	文献[14]
	22.314°N	57.82963°E	瓦希伯沙漠	沉积倒置	钙质胶结角砾岩	文献[19]



A:撒哈拉沙漠东部^[51];B:塔克拉玛干沙漠;C:库姆塔格沙漠;D:柴达木沙漠

图4 沙漠倒置河床表层覆盖物类型

Fig.4 Types of surface covering materials of the desert inverted channels

益于其表层覆盖的“盔甲”,因此大部分的倒置河床表层均为抗蚀性较强的覆盖层,包括胶结硬壳和松散碎屑。但其下部沉积结构在不同区域表现各异,例如库姆塔格沙漠的倒置河床内部有松散的风成沙、冲积粉砂黏土、固结的雅丹^[6, 16-17];柴达木沙漠的倒置河床表层碎屑之下依次为风成沙和冲积鹅卵石^[15];瓦希伯沙漠的倒置河床表层胶结的砂砾下为白云岩类的细黏土沉积物^[19];科罗拉多沙漠的倒置河床砂岩覆盖层下为白色易碎的泥岩^[30]。这些下伏沉积物与表层覆盖物相比,其质地更软,更容易受到风蚀或水蚀,因此它们代表倒置河床周围被外营力侵蚀掉的沉积物类型以及初始沉积环境。总体而言,沙漠倒置河床的沉积结构表现为:表层为抗侵蚀能力较强的松散碎屑和胶结物,其下层为抗侵蚀能力较弱的砂质、黏土质松软物。

4 形成机制

对倒置河床形成机制的探讨最能引起研究者的兴趣。地貌的形态特征、沉积学特征和发育环境是探讨其形成的3个重要方面。基于这些要素,关于倒置河床的形成存在两种假说^[56]。第一种为“景观倒置”说(landscape inversion):河道中堆积了抗蚀力强的沉积物,而河道周边的松软物质被后期侵蚀致使河床相对抬高(图5A)。这一成因主要是由季节性流水事件(例如洪水)堆积,其沉积物一般为粗碎屑。该假说认为,由于倒置河床后期受到侵蚀和崩塌,其宽度(B)要小于原始河道的宽度(w),堆积厚度(T)也要小于原始河道的深度(d)。该成因机制已被广泛用于解释地球上沙漠倒置河床的形成过程(表1),也被用于解释火星倒置河床的形成和古水文环境的重建^[23, 57]。第二种为“沉积倒置”说(deposit inversion):河流长期侧向加积形成河床相

沉积(其沉积物较河岸粗),后被水力、风力、重力等外营力侵蚀,致使原河床相的沙坝体宽度减小并被相对抬高(图5B)。在该假说成因下,倒置河床的宽度(B)大于古河道的宽度(w),其厚度(T)也大于古河道的深度(d)。这两种成因假说均是基于粗细颗粒物的差异侵蚀机理,两者的主要区别在于:①前者的沉积物是由短暂的水流堆积,而后者的沉积物是由长期的水流堆积;②前者一般多为粗细颗粒混杂的冲洪积相且沉积厚度较小,而后者一般具有明显的河流相(例如水平层理、单向斜层理、递变层理)且沉积厚度较大;③前者连贯的河床基本为同一时期的产物,而后者由于沉积时间的差异,其连贯的河床可能是不同时期的产物(图5)。基于上述特征,大部分的沙漠倒置河床的成因属于景观倒置型(表1)。值得指出的是,沙漠倒置河床的形成是由于河床周围沉积物抗侵蚀能力弱而被优先侵蚀,这说明沙漠倒置河床是在松软的基底形成之后发育的,如果能确定松软基底的沉积环境,则可以进一步反映区域环境变化情况。

5 对火星倒置河床研究的启示

火星科学研究的一个重要目标是解读火星早期有河流时的表面环境及其变化^[58]。与火星上的河谷系统(负地貌)相比,倒置河床因其地形发生了转变,可能记录了火星更丰富的环境信息。倒置河床广泛分布于火星南部高原向北部平原过渡的地带,尤其在阿拉伯高地的分布最为集中,与火星河谷系统的分布一致^[22]。现代火星寒冷干燥,尚未发现大规模的流水迹象,因此,地球沙漠倒置河床作为重要类比对象,对于认识火星地表过程、环境变化和演化历史具有重要的潜在研究价值。

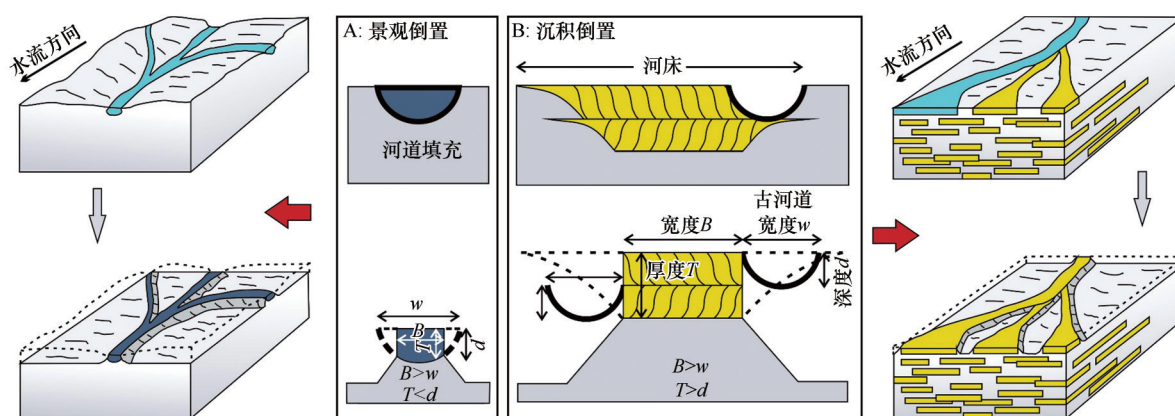


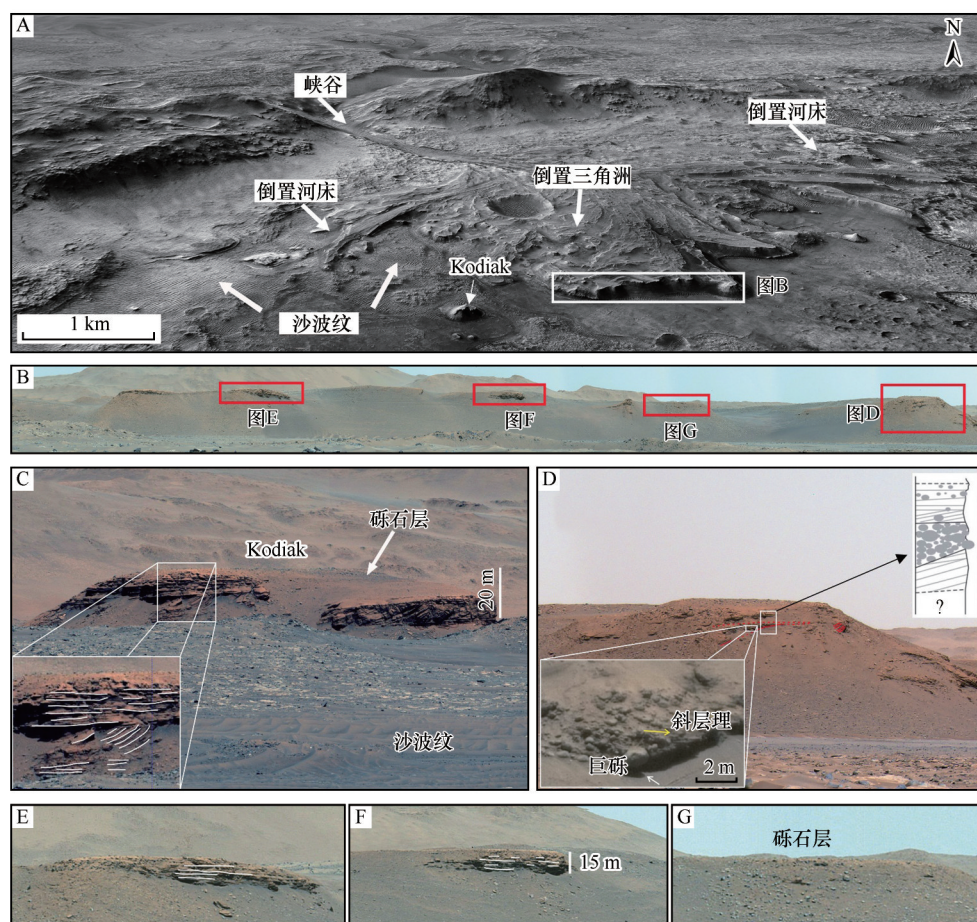
图5 倒置河床的两种形成假说示意图(据文献[30]和文献[56]改绘)

Fig.5 Two formation hypotheses of the inverted channels (the figure has been redraw from the literature [30] and literature [56])

现阶段关于火星倒置河床的研究主要基于遥感影像以及巡视器和着陆器传回的图像数据,无法开展类似于地球上详细的实地调查和实验研究,对其成因机制只能通过地球上的类比研究来揭示。Williams等^[21]和Hayden等^[30]在犹他州发现的倒置河床呈现明显的河流相沉积构造,其顶部平坦并被碳酸盐胶结物覆盖,由此进一步认为火星上的倒置河床属于“沉积倒置型”。然而,Zhao等^[15]在柴达木沙漠发现的倒置河床明显与犹他州的有所不同,其顶部呈尖峰状,并呈现上覆砾石、下伏风成沙、冲洪积砾石为基底的沉积特征,其形成是两期冲洪积过程中夹杂一期风沙入河(干河床)过程所致。这一发现正好能够解释Burr等^[59]在火星奥伊利亚地区(Aeolis region)发现顶部细且尖的倒置河床的成因。由此可见,在火星上同时存在顶部平坦和尖细的倒置河床,根据地球上的类比研究,这两类不同形态的倒置河床可能具有不同的成因机制,但也可能是

差异风化的不同阶段,这一疑问仍有待进一步探索。对火星倒置河床表层覆盖物和内部沉积物类型的判断仍处于推断阶段。与地球上观察到的倒置河床表层覆盖物类似,可能为硫酸盐、铁质氧化物、二氧化硅、黏土和一些卤化物等胶结体^[21];但在过去的30亿年,火星的气候普遍极度干旱,这就使得倒置河床上覆盖松散碎屑的可能性更大^[60]。对于火星倒置河床的内部沉积物类型,Liu等^[23]基于CRISM矿物数据和DEM高程数据对坦佩高地(Tempe terra)东部的倒置河床进行了剖面分析,在其两侧发现了层状蒙脱石物质,并进一步推断倒置河床覆盖层下为河漫滩沉积物。然而,火星倒置河床更准确的物质组成和沉积结构信息仍需未来火星车的实地探索来揭示。

最近,火星着陆巡视器——“毅力号”(Perseverance rover)传回了杰泽罗陨石坑(Jezero crater)内倒置三角洲的高清细节照片(图6),给研究火星倒置



A:三角洲全貌(据文献[51]改绘);B:“毅力号”拍摄的三角洲扇缘(来源NASA);C:Kodiak孤山剖面(来源NASA);
D-G:三角洲前缘剖面(图D中插图来自文献[61],其他来自NASA)

图6 火星杰泽罗陨石坑内的倒置三角洲

Fig.6 Inverted delta in the Jezero crater on Mars

河床的沉积物和沉积构造提供了新的线索。Kodiak 孤山为倒置三角洲的剥蚀残丘,其顶部分布有松散的薄砾石层,其下为明显的水平层理,斜层理分布在水平层理之下且其倾角向下逐渐变缓(图 6C)。三角洲扇缘的沉积构造与 Kodiak 孤山较一致,只不过发现了一个含有砾石(中值粒径为 16.4 ± 2.2 cm)的透镜体(图 6D),可能指示了洪水通道^[61]。由此可见,杰泽罗倒置三角洲体系(包括倒置河床)的表层为砾石覆盖层(图 6G),其下呈现陡坎状的为河流相沉积物(图 6E、F),指示了稳定河流作用后发生的大洪水。这一地区的倒置成因与“景观倒置”假说更接近,即:短暂的洪水携带碎屑堆积在原始河床上,周边未被覆盖的松软物质被侵蚀致使河床被相对抬高。然而,从沉积结构上看(图 6D,插图),这些碎屑也有可能是下层冲洪积物表层被蚀余的“滞留沉积物”(lag deposits)。火星上其他地区的倒置河床成因之谜仍需要更多的实地资料来进一步揭示。

火星的河谷网被认为形成于诺亚纪(距今>37 亿年)至西方纪(距今 30—37 亿年)^[62-63]。然而,对于倒置河床的形成时间仍难以确定,基于火星的地质演化历史(图 7),并结合倒置河床的两种成因假

设可以推断两个不同的时间段。其一,如果火星上的倒置河床是“景观倒置型”,则表示覆盖层堆积在原始河道之上,其发育时间应该晚于河谷网的形成时间。近年来的研究发现,亚马逊纪仍有地表水活动并且形成湖泊和冲积扇等水成地貌,例如 Wilson 等^[65]基于河道特征和水文模拟,认为在火星阿拉伯高地(Arabia terra)北部存在多个活跃于亚马逊纪的湖泊。又如 Grant 等^[66]对盖尔陨石坑(Gale crater)内冲积扇的定年结果表明,部分冲积扇的年龄小于 20 亿年,说明在亚马逊中后期也有可能存在水活动。由此可见,火星倒置河床也有可能是在火星气候逐渐变为干冷(亚马逊纪)以后,由偶发性洪水堆积所致,与地球上的大多数沙漠倒置河床类似。其二,如果是“沉积倒置型”,则表示覆盖层为原始河床沉积物,其发育时间应该与河谷网的形成时间一致。这些河流沉积物发生地形倒置主要是受到后期的差异风蚀^[30,67],反映火星的环境营力过程为由长期的河流作用转变为长期的风蚀作用。上述两种成因类型分别代表了短暂的洪水事件和长期的流水活动,因此,如果能判断火星倒置河床的成因类型,则可以进一步揭示火星的水文活动及其环境演化。

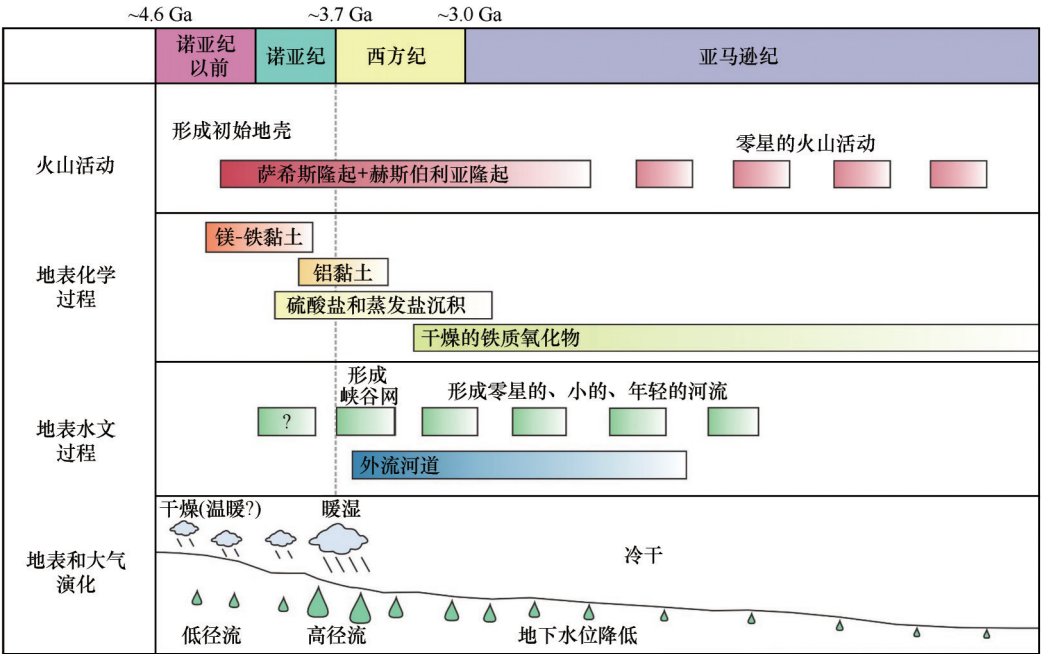


图 7 火星地质演化示意图(据文献[64]改绘)

Fig.7 Schematic diagram of Martian geological evolution (the figure has been adapted from the literature [64])

6 结语

本文基于地貌学思路,系统分析了沙漠倒置河

床地貌的空间分布、形态特征、物质组成、沉积结构以及形成机制。总体上,沙漠倒置河床发育在山前冲洪积平原之上;其形态与现代河流极为类似;其

表层通常覆盖碎屑层或胶结层,下伏质地相对松软的砂、黏土物质;其形成主要是由于河床周边松软的沉积物被优先侵蚀,而使质地较硬的河床被相对抬高所致,具体可以分为“景观倒置”型和“沉积倒置”型。基于地球上取得的上述研究进展,也对火星上倒置河床的形成机制、物质组成与形成时间进行了讨论。尽管地球和火星上的沙漠倒置河床研究取得了重要的进展,但总体上仍处于描述和推测阶段,少有对其形成时代以及区域气候突变进行系统研究,这是未来需要继续研究的一个重要方向。

参考文献:

- [1] 董治宝,苏志珠,钱广强,等.库姆塔格沙漠风沙地貌[M].北京:科学出版社,2011.
- [2] 库姆塔格沙漠综合科学考察队.库姆塔格沙漠研究[M].北京:科学出版社,2012.
- [3] Warren W P, Ashley G M.Origins of the ice-contact stratified ridges (eskers) of Ireland[J].Journal of Sedimentary Research, 1994,64:433-449.
- [4] Hall B L, Hendy C H, Denton G H.Lake-ice conveyor deposits: geomorphology, sedimentology, and importance in reconstructing the glacial history of the Dry Valleys[J].Geomorphology, 2006,75(1):143-156.
- [5] Pain C F, Oilier C D.Inversion of relief: a component of landscape evolution[J].Geomorphology, 1995,12(2):151-165.
- [6] Dong Z, Qian G, Yan P, et al.Gravel bodies in the Kumtagh Desert and their geomorphological implications [J]. Environmental Earth Sciences, 2010,59(8):1771-1779.
- [7] Whitney J D. Report of Progress and Synopsis of the Field Work from 1860 to 1864[M]. Philadelphia, USA: Caxton Press of Sherman & Company, 1865.
- [8] Conte J L. The old river beds of California [J]. American Journal of Science, 1880, s3-19(111):176-190.
- [9] Hörner N G. Lop-nor. Topographical and Geological Summary [M]. London, UK: Taylor & Francis, 1932:297-321.
- [10] Miller R P. Drainage lines in bas-relief [J]. The Journal of Geology, 1937,45:432-438.
- [11] Zaki A S, Giegengack R, Castelltort S. Inverted channels in the Eastern Sahara: distribution, formation, and interpretation to enable reconstruction of paleodrainage networks [M]//Herget J, Fontana A. Palaeohydrology: Traces, Tracks and Trails of Extreme Events. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2020:117-134.
- [12] Roger M H S, Mason T R. Sedimentary environments and trace fossils of tertiary oasis deposits in the central Namib Desert, Namibia[J]. PALAIOS, 1998,13(6):547-559.
- [13] Morgan A M, Howard A D, Hobley D E J, et al. Sedimentology and climatic environment of alluvial fans in the martian Saheki crater and a comparison with terrestrial fans in the Atacama Desert[J]. Icarus, 2014,229:131-156.
- [14] Kar A. Quaternary geomorphic processes and landform development in the Thar Desert of Rajasthan [M]//Bandyopadhyay S, Bhattacharji M, Chaudhuri S, et al. Landforms, Processes and Environment Management. Kolkata, India: ACB Publications, 2011:223-254.
- [15] Zhao J, Wang J, Zhang M, et al. Unique curvilinear ridges in the Qaidam Basin, NW China: Implications for martian fluvial ridges[J]. Geomorphology, 2021,372:107472.
- [16] Wang Z, Lai Z, Qu J. Inverted relief landforms in the Kumtagh Desert of northwestern China: a mechanism to estimate wind erosion rates[J]. Geological Journal, 2015,52(1):131-140.
- [17] 俄有浩,王继和,严平,等.库姆塔格沙漠古水系变迁与沙漠地貌的形成[J].地理学报,2008,63(7):725-734.
- [18] Zaki A S, Pain C F, Edgett K S, et al. Inverted stream channels in the Western Desert of Egypt: synergistic remote, field observations and laboratory analysis on Earth with applications to Mars[J]. Icarus, 2018,309:105-124.
- [19] Maizels J. Raised channel systems as indicators of palaeohydrologic change: a case study from Oman [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1990,76(3):241-277.
- [20] Matter A, Mahjoub A, Neubert E, et al. Reactivation of the Pleistocene trans-Arabian Wadi ad Dawasir fluvial system (Saudi Arabia) during the Holocene humid phase [J]. Geomorphology, 2016,270:88-101.
- [21] Williams R M E, Chidsey E T C, Eby D E. Exhumed paleochannels in central Utah: analogs for raised curvilinear features on Mars [C]//Proceedings of the Central Utah: Diverse Geology of a Dynamic Landscape. Salt Lake City, USA: Utah Geological Association, 2007.
- [22] Dickson J L, Lamb M P, Williams R M E, et al. The global distribution of depositional rivers on early Mars [J]. Geology, 2020,49(5):504-509.
- [23] Liu Z, Liu Y, Pan L, et al. Inverted channel belts and floodplain clays to the East of Tempe Terra, Mars: implications for persistent fluvial activity on early Mars [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2021,562:116854.
- [24] Hynek B M, Beach M, Hoke M R T. Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010,115:E09008.
- [25] Burr D M, Williams R M E, Wendell K D, et al. Inverted fluvial features in the Aeolis/Zephyria Plana region, Mars: formation mechanism and initial paleodischarge estimates [J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2010,115:E07011.
- [26] Giegengack R, Zaki A S. Inverted topographic features, now submerged beneath the water of Lake Nasser, document a morphostratigraphic sequence of high-amplitude late-Pleistocene climate oscillation in Egyptian Nubia [J]. Journal of African Earth Sciences, 2017,136:176-187.
- [27] Matsubara Y, Howard A D, Burr D M, et al. River meandering

- on Earth and Mars: a comparative study of Aeolis Dorsa meanders, Mars and possible terrestrial analogs of the Usuktuk River, AK, and the Quinn River, NV [J]. *Geomorphology*, 2015, 240: 102–120.
- [28] Oviatt C G, Madsen D B, Schmitt D N. Late Pleistocene and early Holocene rivers and wetlands in the Bonneville basin of western North America [J]. *Quaternary Research*, 2003, 60(2): 200–210.
- [29] Clarke J D A, Stoker C R. Concretions in exhumed and inverted channels near Hanksville Utah: implications for Mars [J]. *International Journal of Astrobiology*, 2011, 10(3): 161–175.
- [30] Hayden A T, Lamb M P, Fischer W W, et al. Formation of sinuous ridges by inversion of river-channel belts in Utah, USA, with implications for Mars [J]. *Icarus*, 2019, 332: 92–110.
- [31] Clarke J, Pain C F, Rupert S. Complex expressions of inverted and exhumed relief in central Utah, and some martian counterparts [J]. *Physical Geography*, 2020: 1–18.
- [32] Wang J, Bhattacharya J P. Plan-view paleochannel reconstruction of amalgamated meander belts, cretaceous ferron sandstone, Notom Delta, South-central Utah, U.S.A [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2017, 88(1): 58–74.
- [33] McDonald E V, McFadden L D, Wells S G. Regional response of alluvial fans to the Pleistocene-Holocene climatic transition, Mojave Desert, California [M]//Enzel Y, Wells S G, Lancaster N. *Paleoenvironments and Paleohydrology of the Mojave and Southern Great Basin Deserts*. Boulder, USA: Geological Society of America, 2003: 189–206.
- [34] Morrison R B, Mifflin M D. Lake Tecopa and its environs: 2.5 million years of exposed history relevant to climate, groundwater, and erosion issues at the proposed nuclear-waste repository at Yucca Mountain, Nevada [M]//Lageson D R, Peters S G, Lahren M M. *Great Basin and Sierra Nevada*. Boulder, USA: Geological Society of America, 2000: 355–382.
- [35] Knepper Jr D H. Bedrock erosion surface beneath the rocky flats alluvial fan, Jefferson and Boulder counties, Colorado [J]. *Mountain Geologist*, 2005, 42(1): 1–10.
- [36] Williams R M E, Irwin R P, Burr D M, et al. Variability in martian sinuous ridge form: case study of Aeolis Serpens in the Aeolis Dorsa, Mars, and insight from the Mirackina paleoriver, South Australia [J]. *Icarus*, 2013, 225(1): 308–324.
- [37] Dalstra H J, Gill T, Faragher A, et al. Channel iron deposits, a major new district around the Caliwingina Creek, central Hamersley Ranges, Western Australia [J]. *Applied Earth Science*, 2010, 119(1): 12–20.
- [38] Kepert D, Clarke N, Simpson C, et al. Discovery of the Solomon iron deposits, Hamersley Province, Western Australia [J]. *Applied Earth Science*, 2010, 119(1): 21–27.
- [39] Mann A W, Horwitz R C. Groundwater calcrete deposits in Australia some observations from Western Australia [J]. *Journal of the Geological Society of Australia*, 1979, 26(5/6): 293–303.
- [40] Shaw A I. The characterisation of calcrete based on its environmental settings within selected regions of the Kalahari, Southern Africa [D]. London, UK: University of Oxford, 2009.
- [41] Butzer K W. The holocene lake plain of north Rudolph, East Africa [J]. *Physical Geography*, 1980, 1(1): 42–58.
- [42] Smith R M H, Mason T R. Sedimentary environments and trace fossils of Tertiary oasis deposits in the central Namib Desert, Namibia [J]. *PALAIOS*, 1998, 13(6): 547–559.
- [43] Bristow C S, Drake N, Armitage S. Deflation in the dustiest place on Earth: the Bodélé Depression, Chad [J]. *Geomorphology*, 2009, 105(1): 50–58.
- [44] Brookes I A. Palaeofluvial estimates from exhumed meander scrolls, Taref Formation (Turonian), Dakhla Region, Western Desert, Egypt [J]. *Cretaceous Research*, 2003, 24(2): 97–104.
- [45] Bussert R, Eisawi A A M, Hamed B, et al. Neogene palaeochannel deposits in Sudan-Remnants of a trans-Saharan river system? [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2018, 141: 9–21.
- [46] Zaki A S, Giegengack R. Inverted topography in the southeastern part of the Western Desert of Egypt [J]. *Journal of African Earth Sciences*, 2016, 121: 56–61.
- [47] Girard F, Ghienne J F, Rubino J L. Channelized sandstone bodies ('cordons') in the Tassili N'Ajjer (Algeria & Libya): snapshots of a Late Ordovician proglacial outwash plain [J]. *Geological Society of London Special Publications*, 2012, 368(1): 355–379.
- [48] Padgett G V, Ehrlich R. Paleohydrologic analysis of a late Carboniferous fluvial system, southern Morocco [J]. *GSA Bulletin*, 1976, 87(8): 1101–1104.
- [49] Schuster M, Roquin C, Düringer P, et al. Holocene Lake Mega-Chad palaeoshorelines from space [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24(16): 1821–1827.
- [50] Smith R M H, Sidor C A, Tabor N J, et al. Sedimentology and vertebrate taphonomy of the moradi formation of northern Niger: a Permian wet desert in the tropics of Pangaea [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2015, 440: 128–141.
- [51] Zaki A S, Pain C F, Edgett K S, et al. Global inventory of fluvial ridges on Earth and lessons applicable to Mars [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 216: 103561.
- [52] Bezada M, Barros H, Zavala Reyes M, et al. Earthen ridges in coastal sand dunes of the Caribbean coast, Venezuela: Anthropogenic or natural? [J]. *Geoarchaeology*, 2020, 36(6): 1–12.
- [53] Migo'n P. Inverted relief [M]//Goudie A. *Encyclopedia of Geomorphology*. London, UK: Routledge, 2014: 574.
- [54] Smith R M H. Morphology and depositional history of exhumed Permian point bars in the southwestern Karoo, South Africa [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 1987, 57(1): 19–29.
- [55] Worden R H, Burley S D. Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone [M]//Burley S D, Worden R H. *Sandstone Diagenesis: Recent and Ancient*. Oxford, UK: Blackwell, 2003: 1–44.
- [56] DiBiase R A, Limaye A B, Scheingross J S, et al. Deltaic depos-

- its at Aeolis Dorsa; sedimentary evidence for a standing body of water on the northern plains of Mars[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2013, 118(6): 1285–1302.
- [57] Irwin R P, Lewis K W, Howard A D, et al. Paleohydrology of Eberswalde crater, Mars [J]. *Geomorphology*, 2015, 240: 83–101.
- [58] 欧阳自远, 邹永廖. 火星科学概论[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2017.
- [59] Burr D M, Enga M-T, Williams R M E, et al. Pervasive aqueous paleoflow features in the Aeolis/Zephyria Plana region, Mars [J]. *Icarus*, 2009, 200(1): 52–76.
- [60] Kite E S. Geologic constraints on early Mars climate[J]. *Space Science Reviews*, 2019, 215: 1–47.
- [61] Mangold N, Gupta S, Gasnault O, et al. Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars[J]. *Science*, 2021, 374(6568): 711–717.
- [62] Davis J M, Balme M, Grindrod P M, et al. Extensive Noachian fluvial systems in Arabia Terra: Implications for early Martian climate[J]. *Geology*, 2016, 44(10): 847–850.
- [63] Kite E S, Lucas A, Fassett C I. Pacing early Mars river activity: embedded craters in the Aeolis Dorsa region imply river activity spanned $\geq (1-20)$ Myr[J]. *Icarus*, 2013, 225(1): 850–855.
- [64] Ramirez R M, Craddock R A. The geological and climatological case for a warmer and wetter early Mars [J]. *Nature Geoscience*, 2018, 11(4): 230–237.
- [65] Wilson S A, Howard A D, Moore J M, et al. A cold-wet middle-latitude environment on Mars during the Hesperian-Amazonian transition: evidence from northern Arabia valleys and paleolakes [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, 121(9): 1667–1694.
- [66] Grant J A, Wilson S A. Evidence for late alluvial activity in Gale Crater, Mars [J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, 46(13): 7287–7294.
- [67] Zimbelman J R, Griffin L J. HiRISE images of yardangs and sinuous ridges in the lower member of the Medusae Fossae Formation, Mars [J]. *Icarus*, 2010, 205(1): 198–210.

Study on the desert inverted channels and its implication for the study of the analogue on Mars

Liang Aimin¹, Dong Zhibao¹, Zhang Zhengcai², Su Zhizhu³, Li Chao¹, Zhang Zhi¹, Lv Ping¹

(1. Planetary Aeolian Research Institute / School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. School of History and Culture, Shanxi University, Taiyuan 030006, China)

Abstract: Desert inverted channel is a special river-like positive landform in arid land, which contains information of significant environmental change that results in riverbed revising. Following the geomorphology law, this study investigated desert inverted channels around the world based on the published literature and our field observation. We summarized its spatial distribution, morphological characteristics, material composition, sedimentary structure and formation mechanism. Generally, inverted channels developed in the main sand seas around world. Its surface is composed of debris or cemented materials, subsurface consist of sandy-clay materials with a relatively soft texture. Due to the differential erosion of the sediments in the riverbed and riverbank, the riverbed is relatively elevated. Although some progress has been made in the study of deserts inverted channels on Earth, further research needs to be carried out in terms of their formation age and climatic significance. Meanwhile, more studies should be carried out to compare with the different types of inverted channels on Mars. This will provide important basis for revealing the hydrological activities and environmental changes on Mars.

Key words: inverted channels; desert; Mars; formation mechanism