

冲积扇扇中辫状水道与风成沉积交互沉积特征： 以现代敦煌冲积扇为例^{*}

刘俊玲^{1,2} 尹太举^{1,2} 冯文杰^{1,2} 刘圣乾^{1,2} 李 佳^{1,2}

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 非常规油气地质与工程湖北省工程研究中心, 湖北武汉 430100

摘 要 干旱—半干旱地区的冲积扇与风成沉积相伴发育是一种普遍现象, 冲积扇扇体表面时常受到风的改造作用而发生再沉积, 但目前两者的交互作用及其沉积构型研究尚显不足。为深入理解干旱—半干旱地区冲积扇中风成—水成交互沉积过程, 本研究基于现代遥感影像和野外露头资料, 对现代敦煌冲积扇扇中亚相开展岩相、岩相组合和平面展布的详细观察与解剖。结果表明: 研究区主要发育 9 种岩相、5 种岩相组合, 识别出辫状水道沉积和风成沉积 2 种沉积类型; 其中, 大型交错层理砂岩岩相 (St) 和平行层理砂岩岩相 (Sp), 代表了典型的风成沉积; 5 种岩相组合包括交错层理砾岩—小型交错层理砂岩岩相 (Gt-Scs)、多级颗粒支撑砾岩—小型交错层理砂岩岩相 (Gcm-Scs)、多级颗粒支撑砾岩—团块砂岩岩相 (Gcm-Sm)、侧积薄层砾岩—平行层理砂岩岩相 (Gla-Sp)、多级颗粒支撑砾岩—砂质砾岩/含砾砂岩岩相 (Gcm-Gs/Sg), 代表了辫状水道沉积。平面上, 冲积扇辫状水道与风成沉积毗邻发育; 垂向上, 风成沉积砂岩和辫状水道砂砾岩呈互层发育, 表明 2 种地质营力在不同时期分别占主导地位。基于此, 建立了干旱—半干旱气候背景下, 冲积扇扇中侧缘主次营力旋回控制的“风进水退、水进风退”的沉积模式, 在季风风盛行的干旱时期, 风为主导地质营力, 发育厚层大型交错层理砂岩和平行层理砂岩; 转为降雨量和冰川融水充沛的丰水期, 扇面流水作用主导时, 表现为辫状水道砂岩发育。本研究丰富了冲积扇的沉积构型模式, 对冲积扇砂砾储集层的成因识别和油气勘探开发提供了重要理论依据。

关键词 冲积扇 辫状水道 风成沉积 沉积构型 交互作用 敦煌

第一作者简介 刘俊玲, 女, 1987 年生, 博士研究生, 主要从事沉积学研究。E-mail: liujl365@yangtzeu.edu.cn。

通讯作者简介 尹太举, 男, 1971 年生, 教授, 主要从事沉积学研究。E-mail: yintaij@yangtzeu.edu.cn。

中图分类号: P512.2 **文献标志码:** A

Sedimentary characteristics of braided channels and aeolian deposits in mid-fan of alluvial fan: a case study of the modern Dunhuang alluvial fan

LIU Junling^{1,2} YIN Taiju^{1,2} FENG Wenjie^{1,2} LIU Shengqian^{1,2} LI Jia^{1,2}

1 School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

2 Hubei Engineering Research Center of Unconventional Petroleum Geology and Engineering, Wuhan 430100, China

Abstract The co-development of alluvial fans and aeolian deposits in arid regions is a common phenomenon. While wind reworking and redeposition on fan surfaces are widespread, research on their

^{*} 国家自然科学基金项目(编号: 42130813)资助。[Financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 42130813)]

收稿日期: 2025-07-22 改回日期: 2025-08-23

interactive sedimentation and detailed internal architecture characterization is relatively scarce. Based on modern remote sensing images and field outcrops, this study conducted detailed observations and dissection of the lithofacies, lithofacies associations, and planar distribution within the middle part of the modern Dunhuang alluvial fan. The study area primarily develops 9 lithofacies and 5 lithofacies associations, identifying two main sedimentary types: braided channel deposits and aeolian deposits. Among these, the large-scale cross-bedded sandstone lithofacies (St) and parallel-bedded sandstone lithofacies (Sp) represent typical aeolian deposits. The braided channels mainly develop 5 lithofacies associations: cross-bedded conglomerate facies-small-scale cross-bedded sandstone facies (Gt-Scs), clast-supported conglomerate facies-small-scale cross-bedded sandstone facies (Gcm-Scs), clast-supported conglomerate facies-massive sandstone facies (Gcm-Sm), lateral accretionary thin-bedded conglomerate facies-parallel-bedded sandstone facies (Gla-Sp), and clast-supported conglomerate facies-sandy conglomerate facies/pebbly sandstone facies (Gcm-Gs/Sg). Horizontally, the braided channels of the alluvial fan develop adjacent to the aeolian dunes. Vertically, aeolian sandstones and braided channel sandy conglomerates are interbedded, reflecting the alternating dominance of these two geological agents during different periods. Based on this, a depositional model controlled by cycles of dominant and subordinate agents on the lateral margins of the middle fan under an arid to semi-arid climatic background was established, characterized by “aeolian processes advance when fluvial activity retreats” and “fluvial processes advance when aeolian activity retreats”. During arid periods with prevailing monsoons, wind was the dominant geological agent, depositing thick large-scale cross-bedded and parallel-bedded sandstones. During wet periods with abundant rainfall and glacial meltwater, fluvial processes dominated the fan surface, resulting in braided channel features. This study enriches the depositional architectural models of alluvial fans and provides theoretical support for the genetic identification and hydrocarbon exploration of sandy conglomerate reservoirs within alluvial fans.

Key words alluvial fan, braided channel, aeolian deposits, depositional architecture, interactions, Dunhuang

About the first author LIU Junling, born in 1987, is a Ph.D. candidate. She is mainly engaged in sedimentary geology. E-mail: liujl365@yangtzeu.edu.cn.

About the corresponding author YIN Taiju, born in 1971, is a professor. He is mainly engaged in sedimentary geology. E-mail: yintaij@yangtzeu.edu.cn.

干旱—半干旱地区或者气候背景下，冲积体系与风成沉积普遍伴生发育（许欢等，2023）。例如，甘肃民乐—张掖盆地（梅冥相和苏德辰，2014a）、兰州盆地（梅冥相和苏德辰，2014b）、塔里木盆地北缘库车盆地（梅冥相等，2004）和鄂尔多斯盆地的白垩系（庞军刚等，2011）以及准噶尔盆地南缘的下侏罗统（关旭同等，2019，2025）、西北缘的现代沉积（刘大卫等，2018；Gao *et al.*, 2020；张昌民等，2020a）等众多盆地的地层中均有记录。其中，针对系列盆地的白垩系及侏罗系研究主要关注沉积相构成及序列变化，并基于风成沉积特征进行古环境重建，解译其中蕴含

的全球气候信息和盆山响应过程。而对于现代冲积扇—风成沉积体系，目前大部分学者主要关注冲积扇的沉积特征、内部构型和沉积模式，对其中发育的风成沉积的研究较为薄弱，缺少详细的沉积学分析。Gao 等（2020）在准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇地质调研中，提出扇中发育辫状沟槽沉积，认为扇面风成砂体规模较小，仅在局部发育风成细粒沉积。张昌民等（2020a，2020b）通过准噶尔盆地西北缘现代黄羊泉冲积扇地质调研，认为风力作用对于干旱气候条件下的冲积扇具有明显的改造作用，风力分选可以形成良好的支撑砾石层。

干旱—半干旱地区冲积扇常表现为被风改造的

复合沉积体系。大规模风成沉积和冲积扇的交互沉积作用以及内部构型,目前缺乏精细表征和模式构建。卫星遥感图像显示中国西北地区干旱气候条件下风成沉积与冲积扇伴生发育是一种普遍的地质现象,解剖其内部结构,对砾岩储集层表征和第四纪气候变化具有重要意义。作者通过对现代敦煌冲积扇露头详细解剖,探索冲积扇辫状水道和风营力双重机制下冲积扇扇中沉积构型特征,丰富冲积扇沉积地质库,为冲积扇油气藏勘探开发提供借鉴。

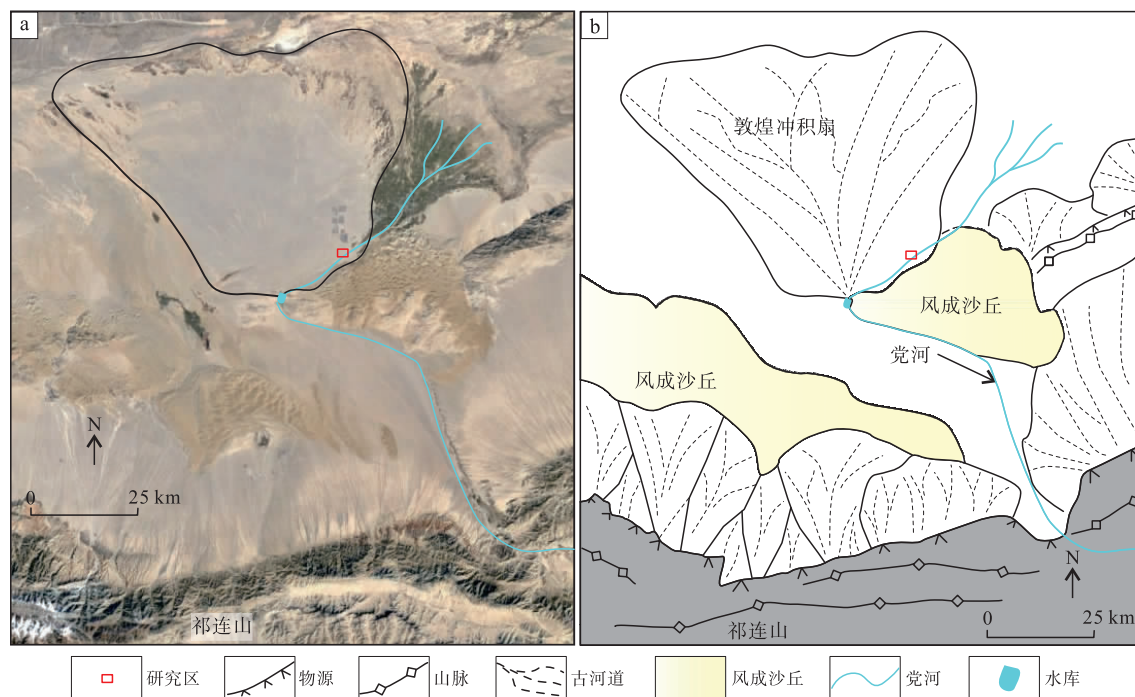
1 区域地质概况

敦煌冲积扇位于祁连山北麓,敦煌市西部,属第四纪沉积(图 1)。扇体规模大,横向展布 45~48 km,纵向展布 42~59 km,面积约 1997 km²,坡降 7‰~8‰。祁连山脉及山麓冲积扇构成主要的物源区,山麓至扇顶汇水区域面积约 1038 km²。

敦煌地区深居内陆,属典型暖温带干旱气候,干燥少雨、蒸发强烈,风沙活动频繁(图 2-a, 2-b)。祁连山物源区托勒站实测年均降水量 275 mm(图 2-c),而敦煌地区年蒸发量高达 2500 mm

(图 2-d)。从地质时间尺度看,该区自晚更新世以来长期处于干旱环境,其演化受青藏高原隆升等构造运动深刻影响,强烈的风沙活动与干旱气候协同作用,使该区域风成沉积极为发育。

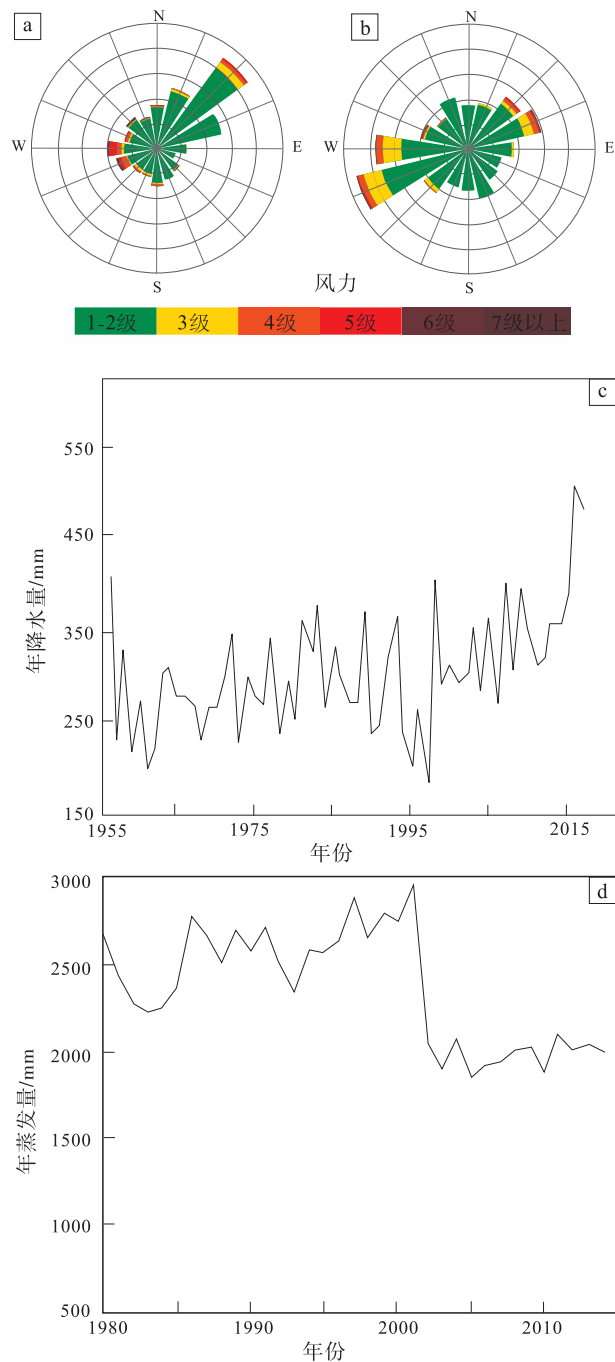
研究区位于该冲积扇扇中东南侧缘的党河流域。2018 年 4 月 19 日,因丝路遗产城景施工,开挖出一条南北向断崖形成优质顺物源剖面,剖面出露高度 18~20 m,长度 60~70 m;景区公路两侧出露垂直物源剖面,剖面高度 4~5 m,长度 50~60 m(图 1-b)。党河为现今扇面活动水道,为一条常年流水的辫状河,河流发源于祁连山南侧,向北经过敦煌冲积扇顶部迁移改道,沿冲积扇东南侧缘由西向东流向下流,1986—2016 年平均径流深 26.66 mm(梁鹏飞等, 2023; 肖洵等, 2023)。研究区东南侧发育约 720 km² 风成沙丘(姚宏乐, 2015),风成沙丘向北侵入党河辫状水道,辫状水道对风成沙丘边部形成冲刷作用,2 种沉积类型之间的边界线形成尖锐波折状,党河辫状水道中常见小型风成沉积(图 1)。因此,该露头所在区域正位于冲积扇辫状水道与风成沉积的交汇区,是探讨两者交互作用的有利位置。



a—敦煌冲积扇卫星地图; b—敦煌冲积扇和风成沉积平面展布

图 1 敦煌冲积扇区域地质概况图

Fig. 1 Regional geological map of the Dunhuang alluvial fan



a—敦煌春夏风向玫瑰图（数据来源：甘肃省气象局）；b—敦煌秋冬风向玫瑰图（数据来源：甘肃省气象局）；c—托勒站 1956—2017 年实测年降水量（据肖洵等，2023；有修改）；d—敦煌 1980—2014 年年平均蒸发量（据张审问，2017；有修改）

图 2 敦煌地区气候特征

Fig. 2 Climatic characteristics of Dunhuang area

2 岩相特征和岩相组合

2.1 岩相特征

根据岩性、沉积结构、沉积构造、几何形态及

空间关系等，并结合敦煌冲积扇沉积背景，在研究区识别出 9 种典型的岩相类型，岩相符号参考 Mi-all (2014) 论述河流沉积体系一书中的划分方案，对于其中未涉及的岩相按照其分类命名原则增加补充(图 3；表 1)。

2.1.1 大型交错层理砂岩岩相 (St)

岩石类型为厚层细砂岩，呈土黄色、分选好、磨圆较好；发育大型交错层理，交错层理单纹层厚度约 10~20 cm，倾角 25°~30°，倾角逐渐向下收敛减小(图 3-a；表 1)；单层高度可达 6 m，前积纹层连续性非常好，延展长度达 50 m 以上。该岩相发育典型的风成交错层理，综合分析判定为风成沉积 (McKee, 1966; Kocurek, 1991; 袁桃等, 2015; 黄乐清等, 2019; Qiao *et al.*, 2025; 梁坤先等, 2025)。

2.1.2 平行层理砂岩岩相 (Sp)

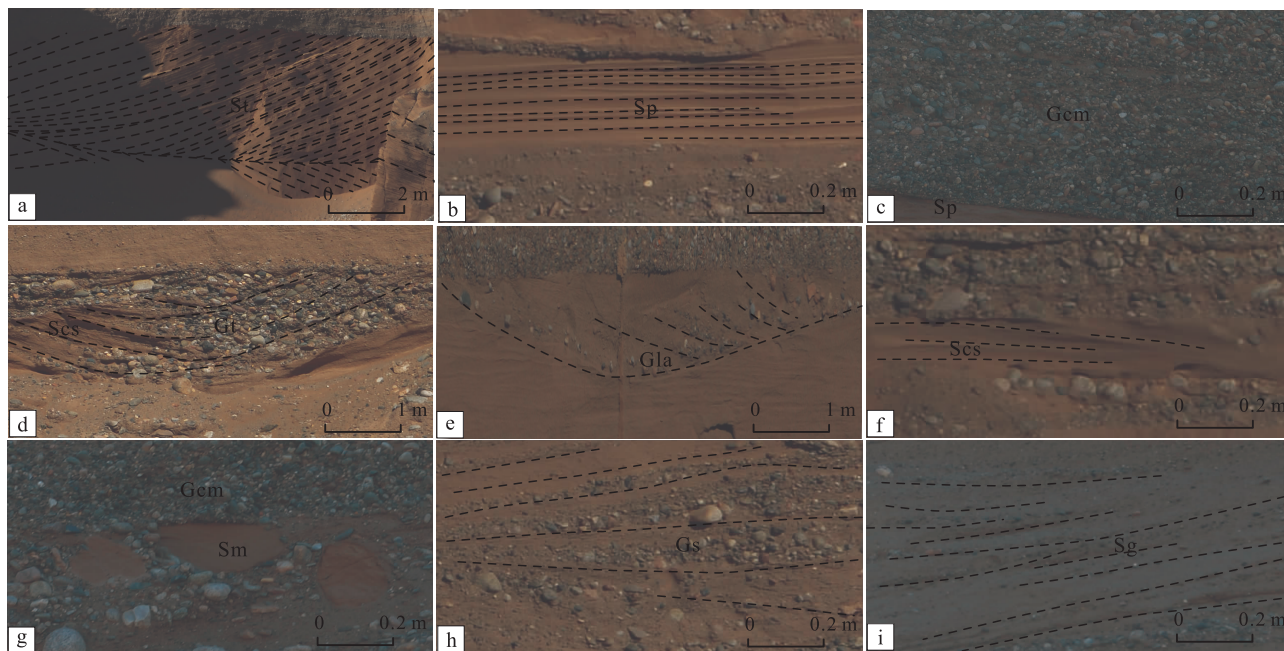
岩石类型以细砂为主，发育（近）平行层理，单纹层厚度 5~10 cm (图 3-b；表 1)。岩相垂向厚度可达 3 m，平行层理连续性好，长度达 50 m 以上。该岩相是在低能、稳定的风力条件下，在平坦的地形上由风成波痕迁移和风力分选作用主导形成的，一般解释为沙席沉积 (Fryberger *et al.*, 1979; 袁桃等, 2015; Cao *et al.*, 2023)；在干旱—半干旱地区，干涸的河床底部有时也会接受风沙沉积形成平行层理 (Gao *et al.*, 2020)。

2.1.3 多级颗粒支撑砾岩岩相 (Gcm)

岩石类型为细—中砾岩，砾石磨圆中等，多为次圆状，颗粒支撑结构，杂基含量小于 15%，杂基成分以砂级碎屑为主，具有多粒级混合、分选差的特点。该岩相多呈顶平底凸的透镜状，多期次切叠发育也可形成厚层状，垂向厚度 0.5~2 m，横向延伸 1~10 m，规模差异大，底部可见明显的冲刷侵蚀面(图 3-c；表 1)。该岩相可解释为辫状水道心滩、河道侧缘坝 (Decelles *et al.*, 1991; Gao *et al.*, 2020)，成因以辫状水道高能洪水快速堆积为主，局部受风成沙丘影响时，风成砂混入充填砾石孔隙 (Langford, 1989)。

2.1.4 交错层理砾岩岩相 (Gt)

岩石类型为细砾岩，颗粒支撑结构，砾石呈次圆状。该岩相呈顶平底凸的透镜状，底部为河道侵蚀面，内部发育槽状交错层理，层理角度最大接近 35°。该类岩相形成于辫状水道内，是河道迁移形



a—大型交错层理砂岩 (St); b—平行层理砂岩 (Sp); c—多级颗粒支撑砾岩 (Gem); d—交错层理砾岩 (Gt); e—侧积薄层砾岩 (Gla); f—小型交错层理砂岩 (Scs); g—团块砂岩 (Sm); h—砂质砾岩 (Gs); i—含砾砂岩 (Sg)

图 3 敦煌冲积扇典型岩相类型野外露头照片

Fig. 3 Selected photos of typical lithofacies in the Dunhuang alluvial fan

成的沙坝复合体 (Hein and Walker, 1977; Allen, 1981; Gao *et al.*, 2020) (图 3-d; 表 1)。

2.1.5 侧积薄层砾岩岩相 (Gla)

岩石类型为细砾岩, 颗粒支撑结构, 砾石呈次圆状, 薄层砾石沿河道迁移的方向呈梳状排列。该岩相为河道底部滞留沉积成因 (Allen, 1965; Hein and Walker, 1977; Gao *et al.*, 2020), 单期次为瓦片状, 多期次组合呈现辫状水道透镜状特征。同时, 由于风营力的淘洗作用, 部分河道底部滞留砾石呈漂砾状分布于风成砂岩中 (图 3-e; 表 1)。

2.1.6 小型交错层理砂岩岩相 (Scs)

岩石类型以中—细粒砂岩为主, 偶含少量砾石, 分选较好, 颜色为棕褐色, 与风成沙丘的土黄色具有明显的区别。该岩相为河床底形迁移成因, 呈条带状分布于辫状水道沉积物中, 单层厚度 10~20 cm, 横向不连续, 通常与河道滞留沉积之间界线不清晰, 呈渐变接触 (图 3-f; 表 1)。该岩相主要形成洪水衰退期辫状沟槽沉积环境的低流态水动力条件 (刘大卫等, 2018; Gao *et al.*, 2020)。

2.1.7 团块砂岩岩相 (Sm)

岩石类型以细砂为主, 分选好, 呈土黄色, 以团块状分布于多级颗粒支撑砾岩 (Gem) 或交错层

理砾岩 (Gt) 岩相中, 呈假“漂砾”的特征。部分砂岩团块中可见交错层理, 层理往往发生揉皱甚至错断, 倾角和倾向差异较大。砂岩团块大小形态各异, 单个团块多呈土豆状、云朵状、不规则状以及撕裂状, 团块小到几厘米, 大到几十厘米, 土豆状、云朵状团块磨圆比不规则状、撕裂状团块好 (图 3-g; 表 1)。

2.1.8 砂质砾岩岩相 (Gs)

岩石类型以细砾为主, 含有少量的粗砂和细砂, 砂质碎屑含量 25%~50%, 砾石含量大于 50%; 该种岩相发育在多级颗粒支撑砾岩 (Gem) 或交错层理砾岩 (Gt) 岩相的上部或边部, 呈伴生关系 (图 3-h; 表 1)。该岩相主要反映顺源方向上的河流水动力逐渐衰减过程, 在现代库车河冲积扇中辫状水道发育典型, 其下游砂质含量显著增加 (高志勇等, 2023); 而本研究认为河道垂向上快速相变除了反映河道能量衰减, 还指示近源砂质物供给增强。

2.1.9 含砾砂岩岩相 (Sg)

岩石类型以细砂为主, 含有少量的粗砂和细砾, 砾石含量 10%~20%; 发育交错层理, 砾石层和砂层呈互层状产出, 该岩相多发育于砂质砾岩岩

表 1 敦煌冲积扇主要岩相类型
Table 1 Typical lithofacies of the Dunhuang alluvial fan

成因类型	岩相类型及代码	描述	岩相模式图
风成沉积	大型交错层理砂岩 (St)	以细砂，分选好，呈土黄色，发育大型交错层理	
	平行层理砂岩 (Sp)	以细砂为主，分选好，呈土黄色，发育断续平行层理	
辫状水道	多级颗粒支撑砾岩 (Gcm)	砾石粒级为细砾，颗粒支撑结构，岩相整体呈块状构造，无明显粒序变化，颗粒间填充细粒碎屑，分选差	
	交错层理砾岩 (Gt)	砾石主要为细砾，颗粒支撑结构，岩相呈顶平底凸的透镜状，底部为河道侵蚀面，内部多发育槽状交错层理	
	侧积薄层砾岩 (Gla)	砾石以细砾为主，颗粒支撑结构，薄层砾石沿河道迁移的方向呈梳状排列	
	小型交错层理砂岩 (Scs)	以中砂-细砂为主，可含有少量砾石，颗粒支撑结构，分选较好，棕褐色，与风成沙丘的土黄色具有明显的区别，发育小型交错层理，呈长板状分布于河道沉积物中	
	团块砂岩 (Sm)	砂质沉积物以不规则团块状分布于砾岩沉积物中	
	砂质砾岩 (Gs)	以细砾为主，含有少量的粗砂，发育交错层理	
	含砾砂岩 (Sg)	以中砂-粗砂为主，含有少量的细砾，砾石含量小于 20%；发育风成交错层理	

相 (Gs) 和平行层理砂岩岩相 (Sp) 之间，是砂岩和砾岩之间的过渡岩相类型(图 3-i；表 1)。该岩相记录了辫状水道沉积向暴露环境的转变过程，其垂向砂岩含量递增标志着水动力持续衰减背景下风成作用的逐步介入，在水成—风成过渡序列中构成中部单元。

2.2 岩相组合特征及成因解释

岩相是组成敦煌冲积扇砂砾岩沉积的基本构成单元，在垂向和侧向相互组合构成多种岩相组合。岩相组合不仅包含岩相特征，还能反映沉积过程和沉积环境。根据垂直物源剖面的详细观察和精细解剖，以单期次河道底部冲刷侵蚀面为构型界面，识别了 5 种典型的辫状水道岩相组合：(1) 交错层理砾岩岩相—小型交错层理砂岩岩相 (Gt-Scs) (图 4-a)；(2) 多级颗粒支撑砾岩岩相—小型交错层理砂岩岩相 (Gcm-Scs) (图 4-b)；(3) 多级

颗粒支撑砾岩岩相—团块砂岩岩相 (Gcm-Sm) (图 4-c)；(4) 侧积薄层砾岩岩相—平行层理砂岩岩相 (Gla-Sp) (图 4-e)；(5) 多级颗粒支撑砾岩岩相—砂质砾岩岩相/含砾砂岩岩相 (Gcm-Gs/Sg) (图 4-f)。

2.2.1 交错层理砾岩岩相—小型交错层理砂岩相 (Gt-Scs)

Gt-Scs 岩相组合是辫状水道沉积微相的常见岩相组合，两种岩相之间多为渐变关系，不存在突变界线(图 4-a)；岩相组合反映了河道内发育各类坝体和河道充填沉积；两种岩相成因机理相似，只是水动力强度和负载沉积物类型上出现差异。

2.2.2 多级颗粒支撑砾岩岩相—小型交错层理砂岩岩相 (Gcm-Scs)

Gcm-Scs 岩相组合的主体为多级颗粒支撑砾岩 (图 4-b)，多级颗粒支撑砾岩是研究区辫状水道的主体岩相，为牵引流成因，砂级碎屑含量增加不

是由于河流流态发生变化,而是河道侵蚀风成沉积,使风成沉积构成辫状水道的近距离物源,沉积物发生变化导致的。因此,Gcm-Scs 岩相组合反映了砾质和砂质河道充填沉积(图 4-b)。

2.2.3 多级颗粒支撑砾岩岩相—团块砂岩岩相 (Gcm-Sm)

Gcm-Sm 岩相组合在多级颗粒支撑砾岩内发育团块砂岩,砂质团块从岩性上与风成沉积相同,却突兀地出现在辫状水道沉积微相中,砂岩和砾岩共生且两者之间往往具有清晰的界线,形成“砾包砂”的特殊现象(图 4-c;图 3-g);根据岩相的岩性特征、外部形态以及内部变形的原始风成层理,Gcm-Sm 岩相组合可以解释为:辫状水道具有较强的不稳定性,受季节性洪水作用或内因驱动容

易发生迁移改道,当水道迁移至风成沉积,将对风成沉积形成侵蚀作用,一部分风成砂被切割后原地或短距离迁移后在河道中堆积,以砂质团块的形式裹挟于河道砾岩之中。随着河道砂质沉积物的增加,也可以形成 Gcm-Sm-Scs 等岩相组合(图 4-d)。

2.2.4 侧积薄层砾岩岩相—平行层理砂岩岩相 (Gla-Sp)

Gla-Sp 岩相组合中侧积薄层砾岩相由多期次的河道底部滞留沉积组成,薄砾岩层呈侧向迁移特征,河道规模逐期变小,表明河道呈现逐步衰退直至废弃的演化过程。此过程中流水作用减弱,同时伴随风力作用增强,因此在干涸的河道内形成平行层理风成砂岩,岩相组合因此呈现辫状水道的顶平底凸透镜状(图 4-e)。

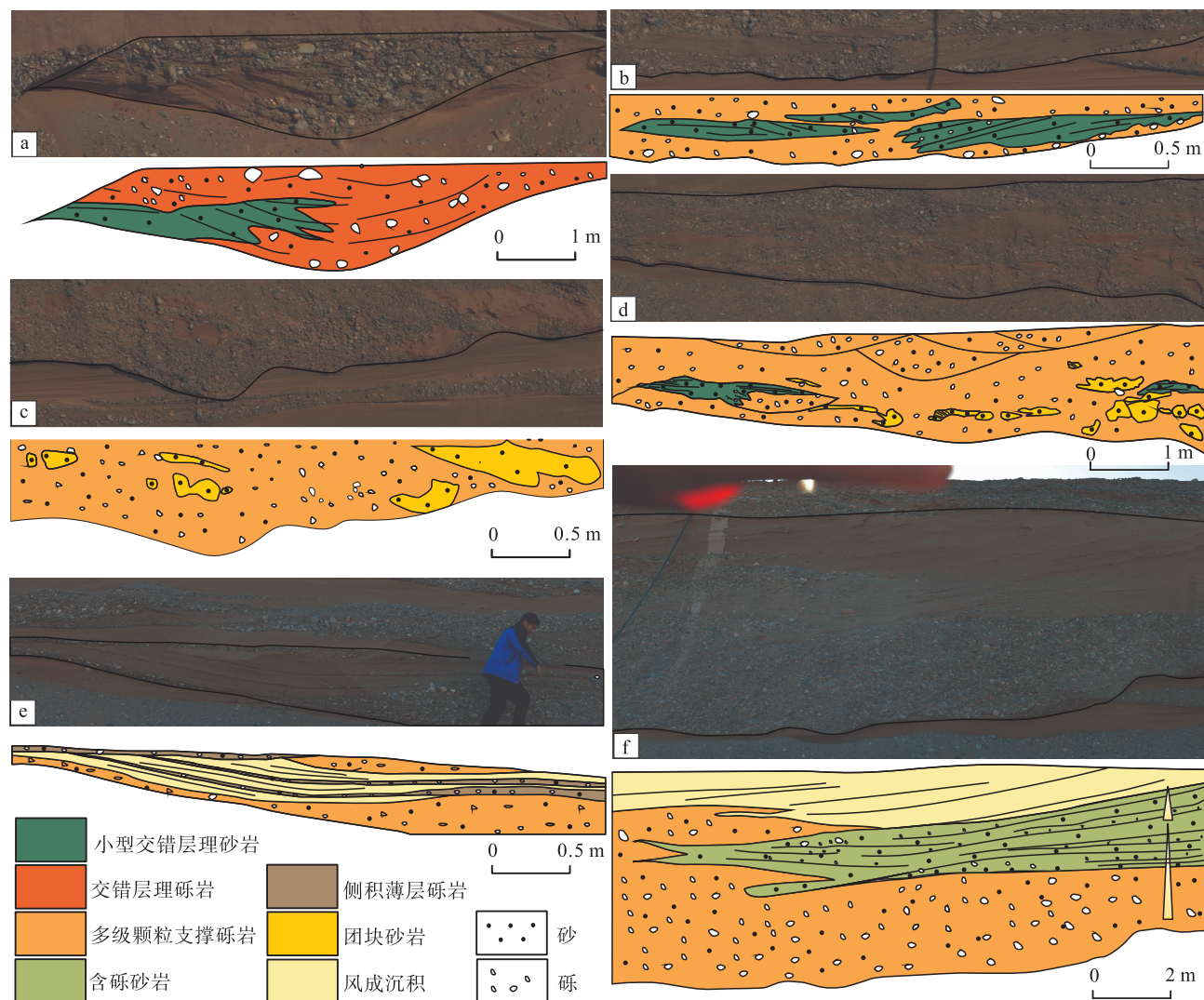


图 4 敦煌冲积扇垂直物源剖面辫状水道岩相组合

Fig. 4 Lithofacies associations of braided channels in transverse section of the Dunhuang alluvial fan

2.2.5 多级颗粒支撑砾岩相—砂质砾岩相/含砾砂岩相 (Gcm-Gs/Sg)

Gm-Gs/Sg 岩相组合下部为辫状水道砾岩，河道上部和边部易受到风力作用的影响，在河流作用衰退期，水携沉积物的负载力衰退，同时伴随风力作用的增强，风成砂堆积在辫状水道上部和边部未过水的洼地，形成砂砾过渡沉积类型。辫状水道作用结束，上部演化为风成沉积，自下而上层理由块状层理、小型交错层理演化为大型交错层理，整个演化过程构成向上变细的“正粒序”演化序列 (图 4-f)。

3 沉积特征和沉积演化

以辫状水道和风成沉积 2 种沉积类型之间的转换界面和单期河道底部冲刷面为构型界面，对顺物源剖面进行综合解释。顺物源剖面自下而上发育 4 个小层，④号层与③号层之间以及②号层与①号层之间为风成—水成沉积转换面，③号层和②号层之间为水成—风成沉积转换面；自下而上分别发育大型交错层理风成砂岩层、辫状水道带砂砾岩层、平行层理风成砂岩层和辫状水道带砂砾岩层。根据含砂率和岩性特征，可将顺物源剖面划分为 2 个由细变粗的沉积旋回。垂向沉积旋回反映出不同时间窗口，冲积扇辫状水道和风营力两者分别占主控作用

(图 5)。

垂直物源剖面只出露上部④号层，层内岩相及岩相组合特征反映出辫状水道主控时期，风力作用的参与使辫状水道带岩相组合更加丰富。风成沉积改造或重塑辫状水道沉积特征，主要表现以下 3 个方面：(1) 辫状水道主控时期，河床局部间歇性干涸暴露形成小型风成沉积，风成沉积以“夹心饼”形式存在于河道砾岩中；(2) 被侵蚀风成沉积构成辫状水道的短距离补给物源区，一部分原地或经过短距离搬运以砂质团块滞留于河道中，一部分随水流负载与远源砾质碎屑共同充填辫状水道，使河道沉积物砂质含量大大增加；(3) 河道上部和边部易受到风力作用的影响，自下而上发育多级颗粒支撑砾岩岩相、砂质砾岩岩相、含砾砂岩岩相和大型交错层理砂岩岩相，形成不同于传统河流相成因的“正粒序”层理 (图 6)。

4 控制因素及沉积模式

4.1 控制因素

结合敦煌冲积扇构造地质背景、第四纪气候演化和干旱区沉积动力学，总结出构造—气候耦合驱动的冲积扇与风成沉积交互沉积过程。

构造地质背景是控制研究区冲积扇与风成沉积毗邻发育的根本因素。敦煌盆地处于塔里木地块东

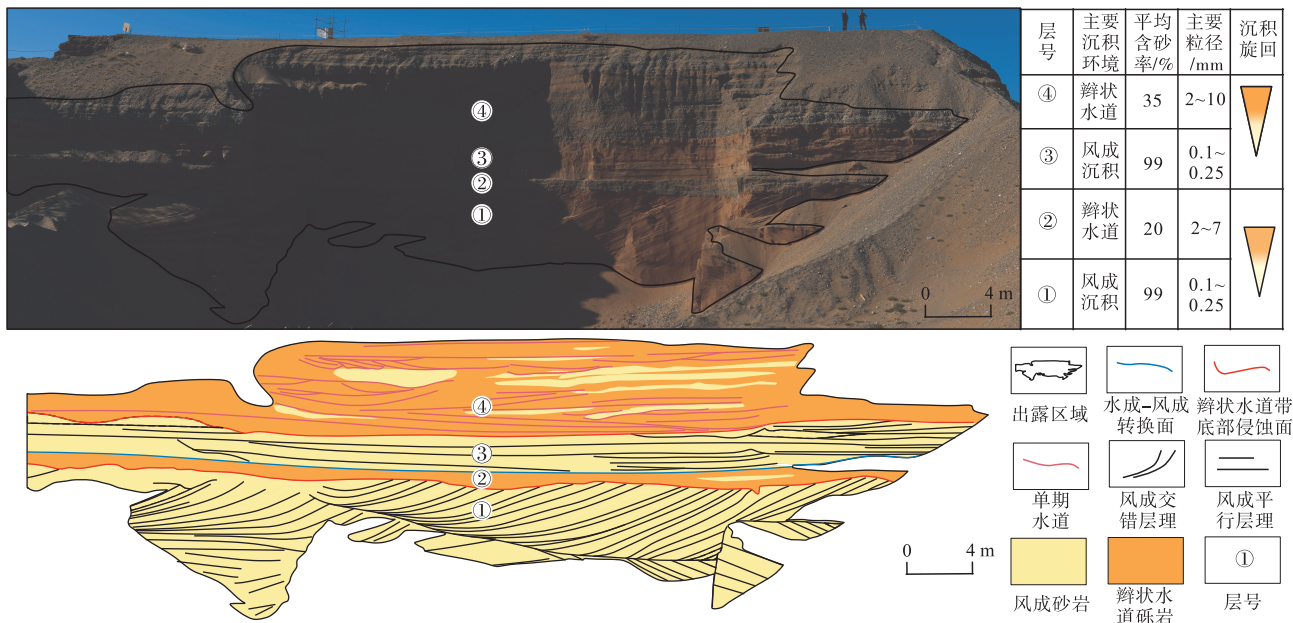


图 5 敦煌冲积扇顺物源剖面沉积特征

Fig. 5 Sedimentary characteristics in the longitudinal section of the Dunhuang alluvial fan

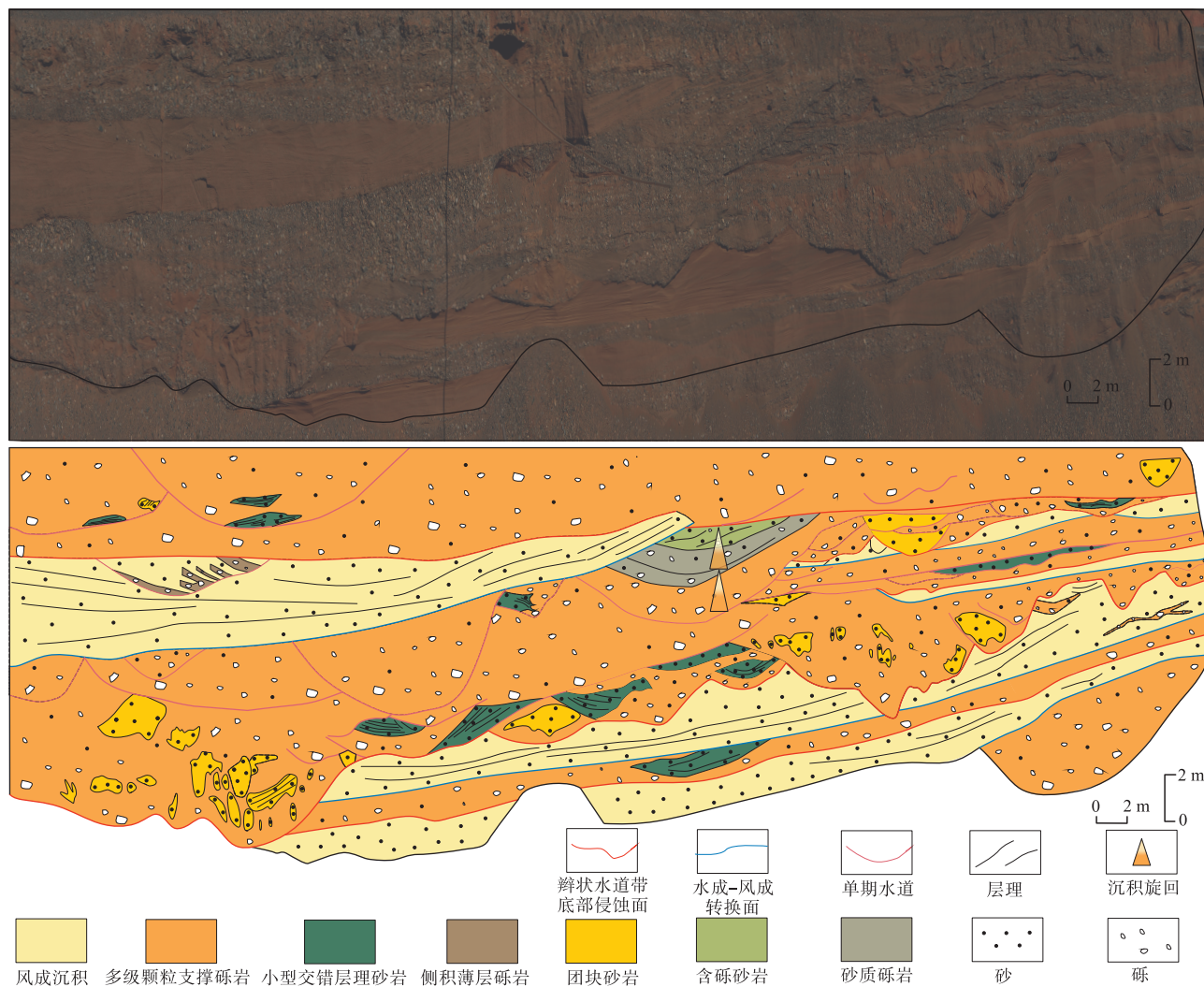


图 6 敦煌冲积扇垂直物源剖面精细解剖

Fig. 6 Detailed analysis of the transverse section of the Dunhuang alluvial fan

北缘、阿拉善地块西南角、北祁连褶皱带北缘 3 大构造单元的交汇部位 (冯怀伟等, 2021), 山前断裂控制祁连山北缘逆冲断裂持续活动, 导致山体以每年 $0.2 \sim 0.3 \text{ mm}$ 的速率阶段性隆升, 为冲积扇提供持续物源和地形高差 (Yang *et al.*, 2018)。盆地基底受阿尔金断裂走滑影响发生差异沉降, 导致扇体向西北方向迁移, 形成叠瓦状扇群。受“狭管效应”影响, 塔克拉玛干沙漠源经“罗布泊风道”向东输送, 一部分遇阿尔金山阻挡后沉降于库姆塔格, 一部分沿阿尔金山与三危山之间的峡谷加速向东南迁移, 形成条带状沙丘链。

不同时间尺度的气候演化控制了冲积扇和风成沉积的交互作用的规模。在百万年尺度上, 青藏高原东北缘 1.2 Ma 以来记录到 4 期与全球冰期同步

的主要寒冷事件; 孢粉组合表明, 早更新世以温带草原为主, 中更新世转向寒旱化, 晚更新世风成砂与黄土广泛发育 (侯元才等, 2001); 在千年尺度上, 祁连山北侧干旱期集中于 18 世纪和 20 世纪, 表现为干—湿—干的变化趋势, 20 世纪 20—30 年代及 90 年代多次出现极端干旱记录 (田沁花等, 2024); 在百年尺度上, 党河径流呈现阶段性波动, 1956—1976 年为枯水期, 1977—1986 年为平水期, 1987—2017 年径流显著增加, 丰枯剧烈波动; 在年际尺度上, 夏季 6~9 月受冰川融水和降雨量影响, 径流量大于全年径流量的 50%, 洪峰频发, 冬春季节, 流量最小 (巴金和王秀琴, 2010; 梁鹏飞等, 2023; 肖洵等, 2023)。

综上所述, 干旱—半干旱气候下冲积扇辫状水

道和风成沉积交互作用程度，相较于基准面变化及构造升降，更加受控于不同时间尺度的气候变化，河流作用的丰枯交替与风力作用的此消彼长是研究区辫状水道和风力交互沉积发育的主要控制因素（图 7）。参考库姆塔格沙漠东南缘砂黄土剖面 4.22 cm/100 a 的沉积速率（丁峰等，2017），结合剖面中风成沉积的厚度，推测本次研究剖面对应的的时间尺度为万年量级（约 15000 年），反映了晚第四纪以来万年尺度的气候波动。

4.2 沉积模式

基于对现代敦煌冲积扇扇中亚相的详细野外观察与岩相分析，建立了干旱—半干旱气候背景下冲积扇扇中风成沉积与辫状水道交互作用的沉积模式（图 8），其核心是“风进水退、水进风退”的主次营力旋回控制机制。

该模式强调，冲积扇扇中的沉积构型受气候波动控制，表现为风力与流水作用在不同时期交替占据主导地位。在干旱枯水期，风营力为主，发育典型的风成沉积，如厚层大型交错层理砂岩（St）和平行层理砂岩（Sp），形成广泛分布的沙席或沙丘沉积。而在降雨和冰川融水充沛的丰水期，流水作用增强，辫状水道活跃，形成以多级颗粒支撑砾岩（Gcm）、交错层理砾岩（Gt）等为代表的河道砂砾岩沉积。

平面上，风成沉积与辫状水道毗邻发育，边界因相互侵蚀改造呈波折状接触（图 8-a，8-b）；垂向上，则呈现风成砂岩与水道砂砾岩互层的多旋回

序列，单个旋回常表现为风成细粒砂岩向上过渡为水道粗粒砂砾岩的“反粒序”，或水道沉积向上渐变为风成砂岩的“正粒序”（图 8-c）。

此外，次要营力在主导营力背景下仍持续对沉积物进行改造。辫状水道主控期间，多期河道经历侧向迁移与切叠，致使单期河道边界模糊，并共同构建了厚层砂砾岩沉积体。同时，河道通过底部侵蚀下伏风成沉积或侧向侵蚀同期风成沉积，致使河道砂质含量增高，从而在河道内部局部形成小型交错层理砂岩条带或短距离搬运再沉积的砂质团块；而在风营力主控时期，偶发的洪水事件也可在风成沉积中刻画出小型水道（图 8-c）。

该沉积模式揭示了气候驱动下地表过程与沉积响应的耦合关系，不仅为识别古代冲积扇—风成交互体系提供了诊断标志，也对这类复杂沉积体系中的储集层非均质性预测和油气勘探开发具有重要指导意义。

5 结论

在干旱—半干旱气候条件下，冲积扇扇中辫状水道往往受到风力和流水双重地质营力的影响，形成风成沉积与粗碎屑水成沉积交互发育的沉积序列。通过岩相和岩相组合分析得到以下结论：

1) 敦煌冲积扇扇中主要发育 9 种岩相，其中大型交错层理砂岩（St）和平行层理砂岩（Sp）为典型风成沉积；辫状水道发育 5 类岩相组合（Gt-Scs、Gm-Scs、Gcm-Sm、Gla-Sp、Gcm-Gs/Sg），记

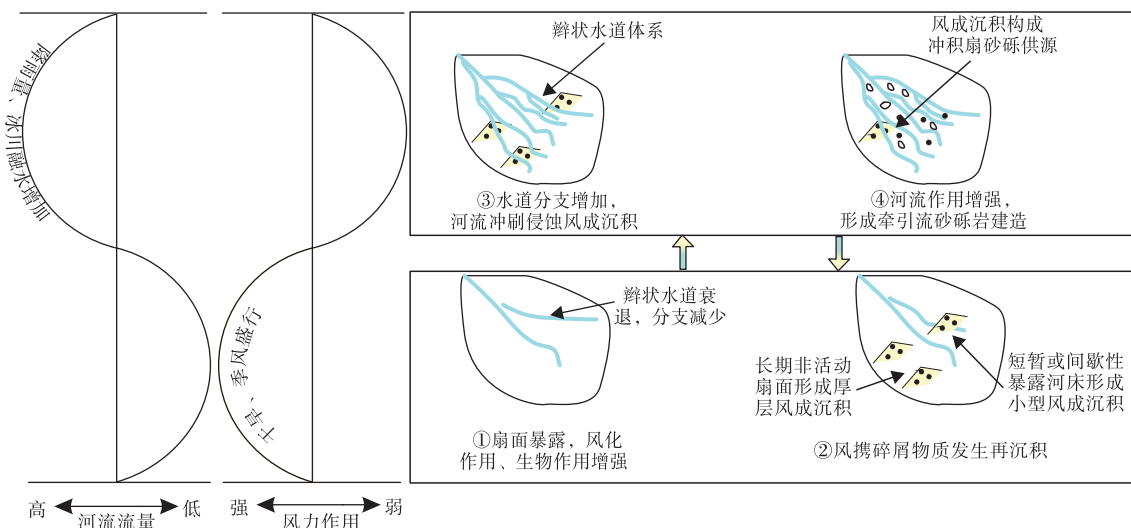
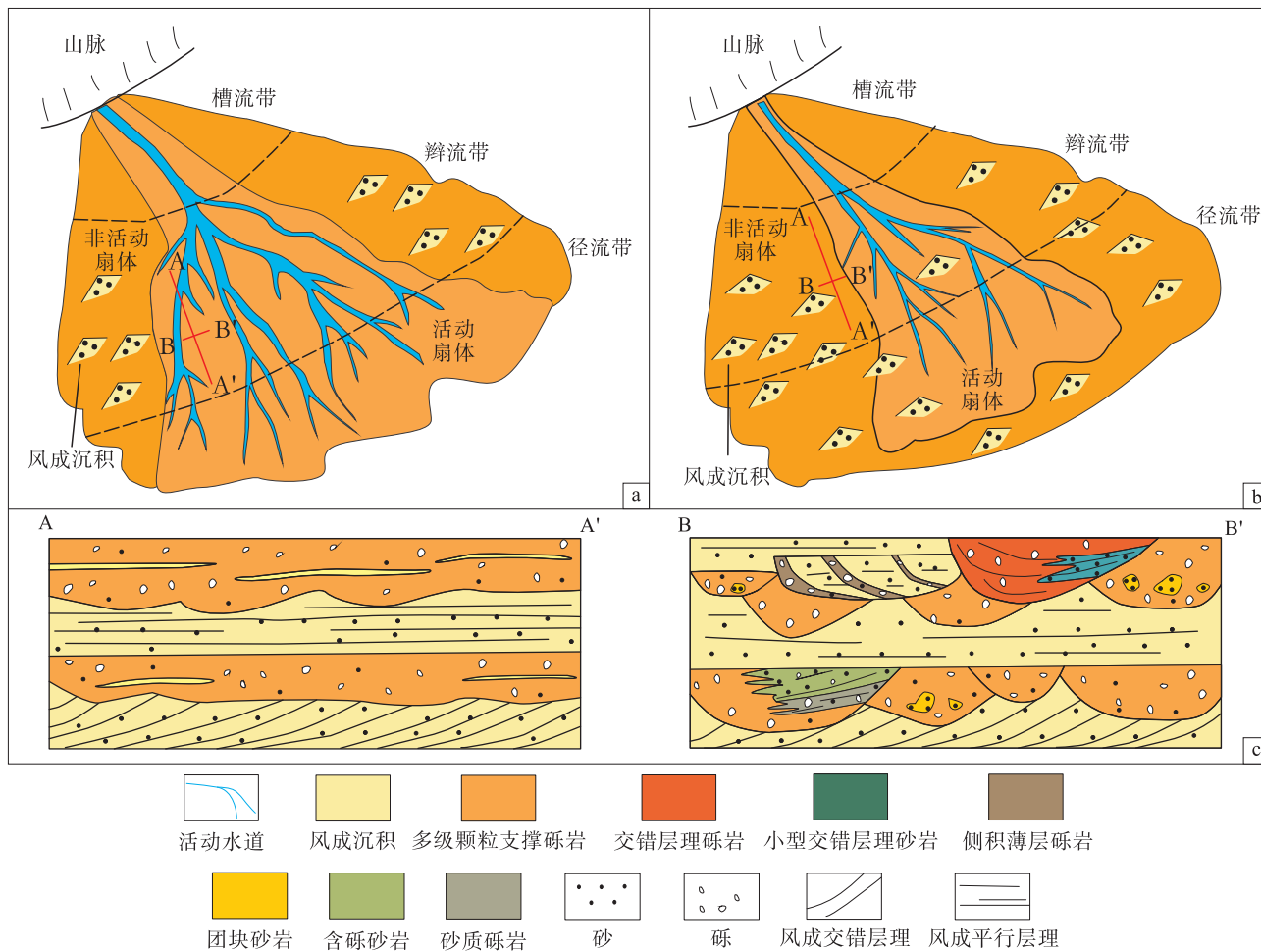


图 7 风力作用和流水作用交互沉积过程及气候对扇体沉积演化的控制

Fig. 7 Climatic controls on alluvial fan evolution and aeolian-fluvial interaction



a—丰水期辫状水道主控平面沉积模式；b—枯水期风营力主控平面沉积模式；c—两种地质营力交替控制的沉积剖面模式

图 8 敦煌冲积扇扇中风成沉积与辫状水道交互发育模式

Fig. 8 Facies model of aeolian-braided channel interaction in middle alluvial fan of the Dunhuang alluvial fan

录了水道的迁移、废弃及风力改造过程。垂向上，风成砂岩与辫状水道砂砾岩构成多旋回序列，表现为风成细粒砂岩—水道粗粒砂砾岩的“反粒序”或水道沉积—风成砂岩的“正粒序”。平面上，辫状水道与风成沉积毗邻发育，边界呈波折状侵蚀接触。

2) 干旱—半干旱背景下，冲积扇扇中沉积构型受控于气候波动主导的地质营力周期性转换。干旱枯水期，风营力主导，发育厚层大型交错层理和平行层理风成砂岩；降雨与融水充沛期，流水作用主导，发育辫状水道砂砾岩组合。“风进水退、水进风退”的营力交替是形成风成沉积和辫状水道交互沉积的根本原因。

3) 风成—水成交互沉积构型特征可以作为识别干旱—半干旱地区古冲积环境的可靠诊断标志，

为高分辨率古气候重建提供了新的沉积学依据；同时，该交互模式增强了砂砾岩储集层的非均质性，直接影响油气渗流规律与开发策略。

参考文献 (References)

- 巴金,王秀琴. 2010. 敦煌近 56a 气候特征分析. 干旱气象,28(3): 304-308. [Ba J, Wang X Q. 2010. Analysis of climate character in Dunhuang in recent 56 years. Journal of Arid Meteorology, 28(3): 304-308]
- 丁峰,唐进年,苏志珠,张进虎,卢琦. 2017. 库姆塔格沙漠东南缘 BL 砂黄土剖面的沉积过程与物源分析. 第四纪研究,37(1): 36-44. [Ding F, Tang J N, Su Z Z, Zhang J H, Lu Q. 2017. Deposited process and provenance analysis of BL sand loess section in south-eastern margin of the Kumtagh Desert. Quaternary Sciences, 37(1): 36-44]
- 冯怀伟,许淑梅,崔红庄,侯旭波,王金铎. 2021. 甘肃敦煌盆地侏罗纪原型盆地性质与沉积环境演化. 地质论评,67(3): 640-654.

- [Feng H W, Xu S M, Cui H Z, Hou X B, Wang J D. 2021. Jurassic depositional environmental evolution and prototype basin in Dunhuang Basin, Gansu Province. *Geological Review*, 67(3): 640–654]
- 高志勇, 冯佳睿, 石雨昕, 罗忠, 张宇航. 2023. 干旱气候下冲积扇—冲积平原曲流河沉积演化过程与展布: 以新疆库车河现代沉积为例. *沉积学报*, 41(6): 1954–1969. [Gao Z Y, Feng J R, Shi Y X, Luo Z, Zhang Y H. 2023. Sedimentary evolution and distribution characteristics of alluvial fan and meandering rivers in an alluvial plain with an arid climate: a case of modern sedimentation in the Kuqa River, Xinjiang. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1954–1969]
- 关旭同, 吴鉴, 魏凌云, 赵进雍, 冯庚, 李严. 2019. 准噶尔盆地南缘建功煤矿剖面齐古组河流沉积与砂体构型. *新疆石油地质*, 40(3): 290–297. [Guan X T, Wu J, Wei L Y, Zhao J Y, Feng G, Li Y. 2019. Meandering river deposit and sand body architecture in Qigu Formation of Jiangong coal mine section in the southern margin of Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 40(3): 290–297]
- 关旭同, 王国荣, 孙潇, 张亚楠, 初亚男, 任楚梵, 吴朝东. 2025. 准噶尔盆地南缘晚侏罗世风成—冲积沉积特征及古环境恢复. *古地理学报*, 27(3): 541–559. [Guan X T, Wang G R, Sun X, Zhang Y N, Chu Y N, Ren C F, Wu C D. 2005. Sedimentary characteristics of the Late Jurassic eolian and alluvial deposits in southern margin of Junggar Basin and palaeoenvironment reconstruction. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(3): 541–559]
- 侯元才, 许伟林, 俞建, 周亚芝. 2001. 青藏高原东北缘 1.2 Ma B. P. 以来各阶段古气候演变. *青海地质*, (S1): 10–16. [Hou Y C, Xu W L, Yu J, Zhou Y Z. 2001. Paleoclimate evolution in various stages since 1.2 Ma b. p. in northeastern Qinghai-Xizang plateau. *Management & Strategy of Qinghai Land & Resources*, (S1): 10–16]
- 黄乐清, 黄建中, 罗来, 王先辉, 刘耀荣, 梁恩云, 马慧英. 2019. 湖南衡阳盆地东缘白垩系风成沉积的发现及其古环境意义. *沉积学报*, 37(4): 735–748. [Huang L Q, Huang J Z, Luo L, Wang X H, Liu Y R, Liang E Y, Ma H Y. 2019. The discovery of Cretaceous eolian deposits at the eastern margin of the Hengyang Basin, Hunan, and its paleoenvironmental significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 37(4): 735–748]
- 梁坤先, 张金明, 宋泰忠, 柯学, 杨文军. 柴达木盆地全新世地层格架与岩相古地理. 2025. *古地理学报*, 27(6): 1466–1484. [Liang K X, Zhang J M, Song T Z, Ke X, YANG W J. 2005. Holocene stratigraphic framework and lithofacies palaeogeography of Qaidam Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(6): 1466–1484]
- 梁鹏飞, 辛惠娟, 李宗省, 南富森, 唐彪, 张文豹. 2023. 基于 Budyko 假设的党河径流变化归因. *中国沙漠*, 43(3): 210–219. [Liang P F, Xin H J, Li Z X, Nan F S, Tang B, Zhang W B. 2023. Study on the attribution of runoff variation in the Danghe River based on the Budyko hypothesis. *Journal of Desert Research*, 43(3): 210–219]
- 刘大卫, 纪友亮, 高崇龙, 靳军, 杨召, 段小兵, 桓芝俊, 罗妮娜. 2018. 砾质辫状河型冲积扇沉积微相及沉积模式: 以准噶尔盆地西北缘现代白杨河冲积扇为例. *古地理学报*, 20(3): 435–451. [Liu D W, Ji Y L, Gao C L, Jin J, Yang Z, Duan X B, Huan Z J, Luo N N. 2018. Microfacies and sedimentary models of gravelly braided-river alluvial fan: a case study of modern Baiyanghe-river alluvial fan in northwestern margin of Junggar Basin. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(3): 435–451]
- 梅冥相, 苏德辰. 2014a. 甘肃张掖地区白垩系风成砂岩沉积序列: 祁连山白垩纪隆升的沉积学响应. *古地理学报*, 16(2): 143–156. [Mei M X, Su D C. 2014a. Cretaceous sedimentary succession of eolian sandstones in Zhangye Region of Gansu Province: sedimentological response to the Cretaceous uplift of Qilian Mountains. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(2): 143–156]
- 梅冥相, 苏德辰. 2014b. 甘肃古浪河口群粗碎屑岩系的层序地层序列: 祁连山白垩纪隆升的沉积学响应. *地质论评*, 60(3): 541–554. [Mei M X, Su D C. 2014b. Sequence-stratigraphic succession for the coarse clastic rock system of the Hekou Group in the Gulang County of Gansu Province: sedimentological response to the Cretaceous uplift of the Qilian Mountains. *Geological Review*, 60(3): 541–554]
- 梅冥相, 于炳松, 靳卫广. 2004. 塔里木盆地北缘库车盆地白垩系风成砂岩研究: 以库车河剖面为例. *地质通报*, 23(12): 1221–1227. [Mei M X, Yu B S, Jin W G. 2004. Cretaceous eolian sandstones in the Kuqa Basin on the northern margin of the Tarim Basin: a case study of the Kuqa River section. *Regional Geology of China*, 23(12): 1221–1227]
- 庞军刚, 国吉安, 李文厚, 李卫红. 2011. 古沙漠记录的沉积体系及层序地层研究进展: 以鄂尔多斯盆地白垩系为例. *地层学杂志*, 35(1): 95–102. [Pang J G, Guo J A, Li W H, Li W H. 2011. Advance of depositional system and sequence stratigraphy in paleo-desert record: taking the Cretaceous strata in Ordos Basin as an example. *Journal of Stratigraphy*, 35(1): 95–102]
- 田沁花, 张同文, 张永, 韩禄斌, 唐飞. 2024. 树轮记录的祁连山南北侧过去约 300 年干旱对比研究. *第四纪研究*, 44(4): 882–894. [Tian Q H, Zhang T W, Zhang Y, Han L B, Tang F. 2024. A comparative analysis of droughts on the southern and northern sides of the Qilian Mountains recorded by tree rings over the past 300 years. *Quaternary Sciences*, 44(4): 882–894]
- 肖洵, 逢敏, 汪静娴, 王华. 2023. 我国西北疏勒河和党河流域径流变化特征及其还原计算分析. *水利水电技术 (中英文)*, 54(S2): 152–162. [Xiao X, Pang M, Wang J X, Wang H. 2023. Characteristics of run off variation and reduction calculation analysis in Shule and Danghe Watersheds in northwest China. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 54(S2): 152–162]
- 许欢, 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 丁家翔, 杜研, 苑婷媛. 2023. 古风成沉积理论体系与研究进展. *沉积学报*, 41(6): 1681–1713. [Xu H, Liu Y Q, Kuang H W, Peng N, Ding J X, Du Y, Yuan T Y. 2023. Theoretical system and research progress of eolian deposits. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(6): 1681–1713]
- 姚宏乐. 2015. 敦煌—格尔木铁路高大沙丘区的风沙环境特征及风

- 沙危害综合防护体系. 中国沙漠, 35(3): 555–564. [Yao H L. 2015. The blown sand characteristics and sand hazards comprehensive protective system at the sand dune areas along the Dun-Ge railway. *Journal of Desert Research*, 35(3): 555–564]
- 袁桃, 吴驰华, 伊海生, 龚政, 王立成, 曾令旗. 2015. 云南思茅盆地景谷地区下白垩统曼岗组风成砂岩沉积学特征及其古气候意义. *地质学报*, 89(11): 2062–2074. [Yuan T, Wu C H, Yi H S, Gong Z, Wang L C, Zeng L Q. 2015. Sedimentology characteristics of eolian sandstones in the Lower Cretaceous Mangang Formation in the Jinggu area, Simao Basin, Yunnan and the paleoclimate significance. *Acta Geologica Sinica*, 89(11): 2062–2074]
- 张昌民, 朱锐, 郭旭光, 王绪龙, 尹太举, 袁瑞, 潘进, 黄云飞. 2020a. 干旱地区河流扇三角洲—河流扇演替模式: 来自黄羊泉扇的启示. *地球科学*, 45(5): 1791–1806. [Zhang C M, Zhu R, Guo X G, Wang X L, Yin T J, Yuan R, Pan J, Huang Y F. 2020. Arid fluvial fan-delta-fluvial fan transition: implications of Huangyangquan fan area. *Earth Science*, 45(5): 1791–1806]
- 张昌民, 宋新民, 王小军, 王绪龙, 赵康, 双棋, 李少华. 2020b. 支撑砾岩的成因类型及其沉积特征. *石油勘探与开发*, 47(2): 272–285. [Zhang C M, Song X M, Wang X J, Wang X L, Zhao K, Shuang Q, Li S H. 2020. Origin and depositional characteristics of supported conglomerates. *Petroleum Exploration and Development*, 47(2): 272–285]
- 张审问. 2017. 敦煌地区水面蒸发量时间演变研究. *中国水利*, (7): 55–56. [Zhang S W. 2017. Study on the temporal evolution of water surface evaporation in the Dunhuang region. *China Water Resources*, (7): 55–56]
- Allen J R L. 1965. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology*, 5(2): 89–191.
- Allen P A. 1981. Sediments and processes on a small stream-flow dominated, Devonian alluvial fan, Shetland Islands. *Sedimentary Geology*, 29(1): 31–66.
- Cao S, Ma J, Wang C S. 2023. The sedimentological characteristics of the intermontane desert system in the Jurong Basin, South China and its relationship with the Late Cretaceous hot climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 623: 111618.
- Decelles P G, Gray M B, Ridgway K D, Cole R B, Pivnik D A, Pequena N, Srivastava P. 1991. Controls on synorogenic alluvial-fan architecture, Beartooth Conglomerate (Palaeocene), Wyoming and Montana. *Sedimentology*, 38(4): 567–590.
- Fryberger S G, Ahlbrandt T S, Andrews S. 1979. Origin, sedimentary features, and significance of low-angle eolian “sand sheet” deposits, Great Sand Dunes National Monument and vicinity, Colorado. *Journal of Sedimentary Research*, 49: 733–746.
- Gao C L, Ji Y L, Wu C L, Jin J, Ren Y, Yang Z, Liu D W, Huan Z J, Du-an X B, Zhou Y Q. 2020. Facies and depositional model of alluvial fan dominated by episodic flood events in arid conditions: an example from the Quaternary Poplar Fan, north-western China. *Sedimentology*, 67(4): 1750–1796.
- Hein F J, Walker R G. 1977. Bar evolution and development of stratification in the gravelly, braided, Kicking Horse River, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 14: 562–570.
- Kocurek G. 1991. Interpretation of ancient eolian sand dunes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 19: 43–75.
- Langford R P. 1989. Aeolian infiltration of interdune sands into fluvial gravels during the deposition of the Triassic Beaufort Group, South Africa. *Sedimentology*, 36(4): 613–626.
- Miall A. 2014. *Fluvial Depositional Systems*. Cham: Springer International Publishing.
- McKee E D. 1966. Structures of dunes at white sands national monument, new Mexico (and a comparison with structures of dunes from other selected areas). *Sedimentology*, 7: 3–69.
- Qiao D W, Peng N, Kuang H W, Liu Y Q, Liu Y X, Cui L W, Wang Y C. 2025. Eolian-fluvial succession in the Early Cretaceous from the Ordos Basin. *Cretaceous Research*, 166: 106031.
- Yang H B, Yang X P, Zhang H P, Huang X N, Huang W L, Zhang N. 2018. Active fold deformation and crustal shortening rates of the Qilian Shan Foreland Thrust Belt, NE Tibet, since the Late Pleistocene. *Tectonophysics*, 742–743: 84–100.

(责任编辑 王绍华)