

潘凯佳,张正偲,钱广强.塔克拉玛干沙漠中东部复合纵向沙垄地貌格局及其成因[J].中国沙漠,2026,46(3):54-65.

# 塔克拉玛干沙漠中东部复合纵向沙垄地貌格局及其成因

潘凯佳<sup>1,2</sup>, 张正偲<sup>3</sup>, 钱广强<sup>1</sup>

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院 干旱区生态安全与可持续发展全国重点实验室, 甘肃 兰州 730000;  
2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.陕西师范大学 地理科学与旅游学院/钱学森沙产业陕西省高等学校重点实验室, 陕西 西安 710119)

**摘要:** 塔克拉玛干沙漠是中国最大的沙漠,也是世界第二大流动沙漠,沙丘类型丰富多样。其中,中东部地区广泛发育典型复合纵向沙垄,且呈现明显空间分异特征,而目前关于复合纵向沙垄形态特征及其形成机制仍缺乏系统深入研究。本研究通过提取研究区内18.6万km<sup>2</sup>复合纵向沙垄脊线长度、间距、缺陷密度等关键形态参数,系统解析其宏观地貌格局。结果表明:塔克拉玛干沙漠东部复合纵向沙垄呈脊线短、间距宽、高度大、缺陷密度低的格局;中部则对应脊线长、间距窄、高度小、缺陷密度低的特征。中东部复合纵向沙垄地貌格局主要受风况和沙源共同影响,但二者权重因参数而异。脊线长度主要受RDP与至河流距离交互控制( $q=0.42$ ),RDP与风向交互作用( $q=0.27$ )对间距影响最大,脊线高度变异由DP与EST交互主导( $q=0.60$ ),脊线走向取决于DP与风向协同( $q=0.54$ ),脊线缺陷密度依赖于DP与EST耦合( $q=0.20$ )。本研究从宏观格局层面深化了对复合纵向沙垄形态与过程耦合机制的认识,丰富了风沙地貌研究范畴,补充了复合纵向沙垄形成与演化研究内容,为风沙灾害防治和地貌区划提供参考依据。

**关键词:** 塔克拉玛干沙漠; 复合纵向沙垄; 地貌格局; 输沙势; 沙源

文章编号: 1000-694X(2026)03-054-12

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2025.00158

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

## 0 引言

地貌格局指地貌类型的空间组合形式。在风沙地貌学领域,沙丘格局是沙丘地貌最直观的特征,是风况、沙源与植被等要素长期相互作用、自组织演化的产物<sup>[1-2]</sup>。地貌格局的空间变化可以揭示沙丘区的空间规律与演化机制<sup>[3-4]</sup>。地貌格局的研究从20世纪90年代以来逐渐受到地貌学界关注<sup>[1]</sup>。Ewing等<sup>[3]</sup>通过卫星影像获得全球沙漠的沙丘参数(间距、高度、走向、缺陷密度等),并结合年代学证据建立沙丘参数与形成年代间的关系。董治宝等<sup>[4]</sup>提取库姆塔格沙漠北部线形沙丘地貌格局参数,结合风况分析其概率分布、空间变化及形成时间。Li等<sup>[5]</sup>基于遥感影像系统解析了柴达木盆地简单横向

沙丘格局,提出沙源-风况耦合驱动的自组织均衡格局及高海拔风沙阈值。Liu等<sup>[6]</sup>通过高分辨率DEM和光谱数据揭示火星风沙地貌稳定-活跃动态格局。Zheng等<sup>[7]</sup>基于Google Earth Engine平台提出全球沙丘分类新方法,改善遥感影像地表类型混淆问题。所以,当前对风沙地貌格局研究的新方法、新对象、新区域逐步成为研究热点。

从沙丘地貌格局驱动机制来看,风动力、沉积物和下垫面性质等是影响地貌格局的核心因素<sup>[8]</sup>,其中风动力为主导驱动力,风速、风向及其变率塑造沙丘基本形态、空间展布与演化规律<sup>[3-4]</sup>。精确刻画风况参数,是理解风沙地貌形成机制、预测沙丘移动以及评估风沙灾害风险的理论基础。凌裕泉<sup>[9]</sup>率先解析塔克拉玛干沙漠近地表流场与输沙强度

收稿日期:2025-10-10; 改回日期:2025-10-24

资助项目:第三次新疆综合科学考察项目(2021xjkk0301);国家自然科学基金项目(42241110);中央高校基本业务经费(GK202502004, GK202306002, GK202309006)

作者简介:潘凯佳(1998—),女,山西大同人,博士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: pankaijia10@163.com

通信作者:张正偲(E-mail: zhangzhengcai@snnu.edu.cn)

关系,奠定该区域沙漠化研究的风况基础,迄今仍为主流参照。李振山等<sup>[10]</sup>最早给出塔克拉玛干起沙风统计阈值,俎瑞平等<sup>[11]</sup>则进一步细化风况季节分异,为区域输沙计算提供长期观测基准。Liu等<sup>[12]</sup>基于1979—2016年再分析资料与野外观测,揭示塔克拉玛干近地层风况时空分异规律,为区域输沙模式与沙丘动态模拟提供高分辨率风况基准。沙源是沙丘形成发育的物质基础。王训明等<sup>[13]</sup>指出塔克拉玛干沙漠中部简单横向沙丘形态参数与沙源丰度密切相关,沙源不同丰度导致简单横向沙丘形态学参数之间有明显不同。张翰之等<sup>[14]</sup>通过测定塔克拉玛干沙漠中南部纵向沙垄-穹状沙丘复合区碎屑锆石形态参数确认其主体沙源来自昆仑-阿尔金造山带古河湖体系,并为塔克拉玛干物源研究提供可对比的形态标尺。王宁波等<sup>[15]</sup>发现塔克拉玛干沙漠腹地复合沙垄间地上覆沙丘空间分布与风动力和沙源密切相关。Song等<sup>[16]</sup>揭示了沙丘空间分布与古河道密切关联,干涸河道在演化后期成为重要沙源。Zhang等<sup>[17]</sup>通过测年数据表明河流不仅提供物源限制沙丘发育规模,其河道迁移还直接划定地貌格局边界。Chen等<sup>[18]</sup>通过REEs示踪量化塔克拉玛干沙漠物源分区与地貌格局耦合关系,表明阿尔金山和东天山是西部巨型沙丘和低矮线形沙丘的主导物源,导致西部高大连续与东部低矮破碎的地貌格局,为干旱区物源-地表过程-地貌演化的耦合研究提供范式。上述研究虽明确了风况与沙源对风沙地貌格局形成的重要性,却尚未针对塔克拉玛干沙漠复合纵向沙垄构建系统、定量的地貌格局驱动机制框架。

塔克拉玛干沙漠是中国第一大、世界第二大流动沙漠<sup>[8,19]</sup>,风沙地貌类型复杂多样,兼具简单沙丘(新月形、线形、格状、穹状和金字塔)与复合型沙丘(新月形沙丘链、复合沙山和复合纵向沙垄等)<sup>[8,20]</sup>,构成完整的沙丘演化序列。塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究自20世纪80年代航片定性描述以来,始终未脱离局部区域、单一类型、形态描述的范式。朱震达等<sup>[8]</sup>依据航片和实测数据定性描述塔克拉玛干沙漠风沙地貌空间分布特征;岳健等<sup>[21]</sup>归纳局部复合纵向沙垄格局与连接方式;刘鑫等<sup>[22]</sup>则局限于沙漠边缘新月形沙丘的迁移速率。Li等<sup>[23]</sup>利用多源遥感与航拍数据仅对沙漠东部大型沙丘形态格局与演化机制进行探索。迄今,中东部

核心区复合纵向沙垄宏观空间分异仍缺乏高精度、全覆盖的定量刻画,其成因机制更未得到系统解析。

因此,本研究聚焦塔克拉玛干沙漠中东部复合纵向沙垄,基于高分辨率遥感影像与长序列气象数据,提取脊线长度、间距、缺陷密度等关键形态参数,定量刻画空间分异格局;并结合风场-沙源耦合指标解析驱动机制,以期为其风沙地貌演化研究提供定量依据,拓展干旱区复杂沙丘系统研究的理论框架。

## 1 研究区与方法

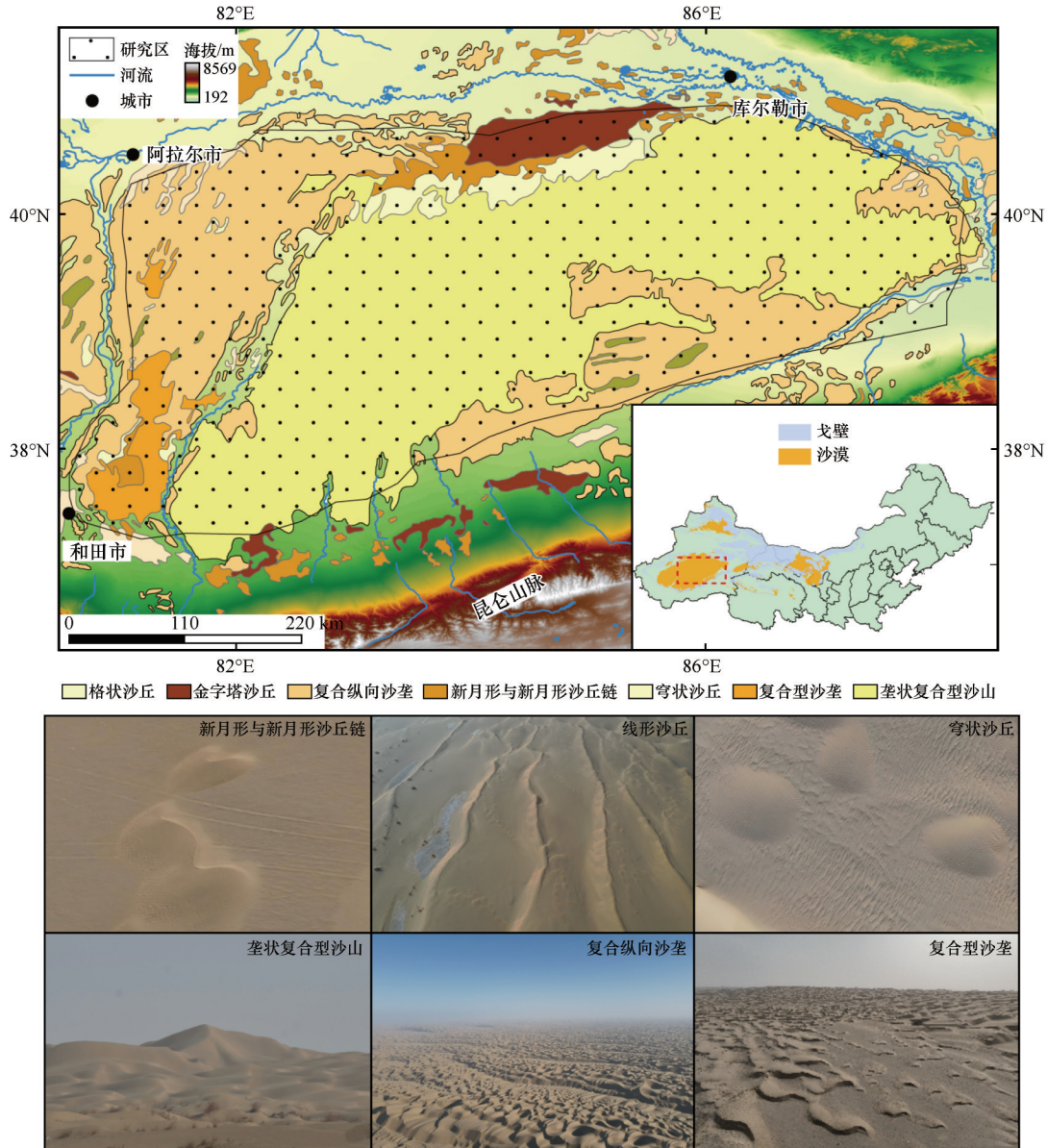
### 1.1 研究区概况

塔克拉玛干沙漠位于中国西北部(36°40′—41°46′N,77°58′—88°29′E),总面积约33.7万km<sup>2</sup>。该沙漠年降水量自沙漠边缘(东北部约100 mm)向腹地减少(中部仅约50 mm);年平均气温9~11℃,昼夜温差大,属于典型干旱区<sup>[24]</sup>。沙漠内部沙丘类型齐全,从简单新月形沙丘、横向沙丘、线形沙丘、金字塔沙丘到复合纵向沙垄、复合穹状沙丘及复杂横向沙丘等均有广泛分布(图1)。本研究聚焦该沙漠中东部典型复合纵向沙垄。

### 1.2 数据与方法

研究采用Danielson等<sup>[25]</sup>发布的30 m空间分辨率DEM(<http://viewfinderpanoramas.org/>)。该数据集以SRTM为基础,融合ASTER GDEM并修复空像元与异常值,垂直精度10 m,水平精度20 m,可满足复合纵向沙丘形态量测需求。遥感数据选用美国地质调查局(USGS)Landsat-8/9 OLI/TIRS影像(30 m分辨率,<https://earthexplorer.usgs.gov/>),获取时间集中于2024—2025年,用于识别沙丘脊线。利用DEM和高分辨率遥感影像,提取刻画复合纵向沙垄形态关键参数。

鉴于塔克拉玛干沙漠中东部幅员辽阔,我们将其划分为15 km×15 km的网格,共798个。综合考虑指标代表性与DEM数据可计算性,在每个网格内提取并计算沙丘脊线长度、走向、间距、高度、缺陷密度5个形态参数。针对复合纵向沙垄,因其脊线绵长,沿脊线等距选取3处,取最高点与最低点垂直高差的均值作为该网格的脊线高度;脊线间距则



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2023)2767号标准地图制作,底图边界无修改

图1 研究区概况及其典型沙丘类型

Fig.1 Location of the study area and the typical aeolian geomorphology in the central-eastern Taklamakan Desert, China

沿上一道沙垄脊线走向等间距布设3个测点,测量至下一道沙垄脊线垂足的距离,并以3段长度的平均值作为最终间距。本研究复合纵向沙垄的空间分布如图2所示。

脊线缺陷密度是单位脊线长度内出现的中断、分叉、交汇等拓扑缺陷的个数<sup>[26]</sup>,用于量化沙丘脊线的完整性与复杂度,可等同于沙丘密度<sup>[3]</sup>。

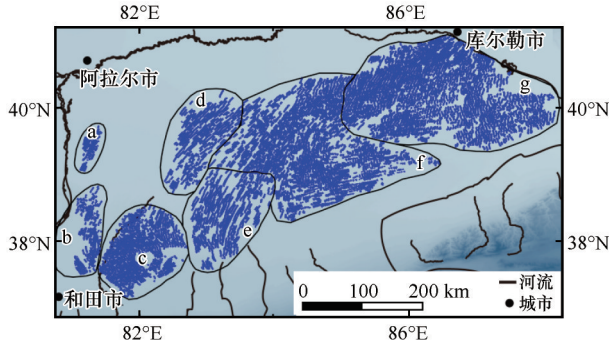
为解析沙丘形态与区域风动力耦合关系,本研究风场数据选用Era5-Land 10 m高度逐日再分析产品(1980—2025年),根据风速风向数据计算了各输沙势参数。输沙势(DP)和合成输沙势(RDP)计算

公式如下<sup>[27]</sup>:

$$DP = \frac{\sum_{i=2}^{N_{obs}} \vec{Q}_i (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^{N_{obs}} (t_i - t_{i-1})} \quad (1)$$

$$RDP = \frac{\sum_{i=2}^{N_{obs}} \vec{Q}_i (t_i - t_{i-1})}{\sum_{i=2}^{N_{obs}} (t_i - t_{i-1})} \quad (2)$$

式中:DP反映风速统计某一方向在一定时间内搬运沙子的能力,输沙玫瑰图中各个方向输沙势的矢量合成称为RDP,DP和RDP单位为 $m^2 \cdot a^{-1}$ ;t为不同



注: 基于新疆维吾尔自治区地理信息服务平台审图号新S(2023)063号标准地图制作, 底图边界无修改

图2 各分区复合纵向沙垄空间分布

Fig.2 Distribution of the compound longitudinal dunes in different regions of the study area

时刻( $t_i \leq t_i \leq t_{N_{obs}}, i \in [1, N_{obs}]$ );  $i$  为每个时间步长;  $\vec{Q}_i$  为第  $i$  个时间步长平均输沙通量(单位为  $\text{m}^2 \cdot \text{a}^{-1}$ );  $t_i - t_{i-1}$  为第  $i$  个时间步长的持续时间。

对每个时间步长计算平坦沙床的饱和输沙通量, 计算公式为:

$$\vec{Q}_i = \begin{cases} Q_i \vec{x}_i, & u_i^* \geq u_c \\ 0, & u_i^* < u_c \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $u_i$  和  $\vec{x}_i$  分别为不同时刻对应的风速与风向。当  $u^* = u_i^*$ ,  $Q_i = Q$ 。

采用 Ungar 等<sup>[28]</sup>提出的输沙率公式:

$$Q = 25 \frac{\rho_t}{\rho_x} \sqrt{\frac{d}{g}} (u_i^* - u_c^*)^2 \quad (4)$$

式中:  $Q$  表示单位长度饱和输沙体积通量;  $g$  为重力加速度 ( $g = 9.81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ );  $d$  为沙粒粒径 ( $d = 180 \mu\text{m}$ )。

沙粒起动临界剪切速度  $u_c$  采用 Iversen 等<sup>[29]</sup>的公式计算:

$$u_{*c} = 0.1 \sqrt{\frac{\rho_s}{\rho_f} g d} \quad (5)$$

式中:  $\rho_s$  为沙粒密度 ( $\rho_s = 2.55 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $\rho_f$  为空气密度 ( $\rho_f = 1.293 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )。

对每个时间步长  $i$ , 采用以下公式计算剪切速度:

$$u_i^* = \frac{u_i k}{\lg(z/z_0)} \quad (6)$$

式中:  $z = 10 \text{ m}$ , 为测风数据的观测高度;  $z_0 = 10^{-3} \text{ m}$ , 为特征地表粗糙度;  $k = 0.4$ , 为冯·卡门常数。

等效沙丘厚度 EST 是一种间接表示沙丘沙物质供应量的参数, 通常表示为单位面积上平均沙层厚度, 单位为  $\text{m}$ <sup>[30]</sup>:

$$EST_i = \text{avg}_{d_{i,j} < 10000} \{ Z_i - \text{avg}_{\{d_{i,j} < 2000\}} [\min_{d_{i,j} < 2000} (\text{med}_{d_{i,j} < 90} (Z_j))] \} \quad (7)$$

式中:  $Z_i$  为相邻格网高程;  $\text{avg}_{d_{i,j} < 10000}$  为距离  $d_{i,j}$  范围内平均高程;  $\text{avg}_{d_{i,j} < 2000}$  为范围小于 2 000 m 高程;  $\text{avg}_{d_{i,j} < 90}$  为小于 90 m 高程。

## 2 结果与分析

### 2.1 各分区复合纵向沙垄空间分异

本研究聚焦塔克拉玛干沙漠中东部典型复合纵向沙垄, 沿用朱震达等<sup>[8]</sup>下伏地貌成因-沙丘类型 7 亚区划分方案, 结合高分辨率遥感影像与 DEM 复核细化研究亚区(图 2)。受影像分辨率与过渡带渐变性影响, 局部边界存在偏差, 但宏观可区分沙丘类型, 满足区域尺度对比需求。各亚区形态特征如下: ① a、b 区: 面积较小(0.15 万、0.6 万  $\text{km}^2$ ), 分布于  $80.8^\circ - 81.3^\circ \text{E}$ , 以高大复合纵向沙垄( $< 25 \text{ m}$ )与宽广垄间地(湖盆分布)相间分布。② c 区: 面积约为 1.6 万  $\text{km}^2$ , 位于克里雅河与尼雅河间的北民丰隆起。以复合横向沙山和纵向沙丘为主(50~100 m), 垄上叠置格状或新月形沙丘, 垄间地分布线形沙丘、格状沙丘及少量干湖盆和灌丛。③ d、e 区: d 区面积 1.3 万  $\text{km}^2$  ( $38.5^\circ - 40^\circ \text{N}$ ), e 区面积 1.8 万  $\text{km}^2$  (尼雅河和安迪尔河间); 二者均以 25~50 m 复合纵向沙垄为主, d 区迎背风坡均叠次生格状沙丘, 垄间地有零星干湖盆, e 区垄上叠置格状沙丘, 垄间地为线形沙丘、干湖盆及戈壁。④ f 区: 面积约为 2.9 万  $\text{km}^2$ , 分布于  $83.7^\circ - 86.2^\circ \text{E}$ 。以 50~100 m 的复合纵向沙垄和新月形沙丘链为主。⑤ g 区: 面积最大(3.5 万  $\text{km}^2$ ), 分布于  $84.8^\circ - 88.2^\circ \text{E}$ , 受河流影响显著。以垄高  $> 100 \text{ m}$  的复合纵向沙垄为主, 垄上叠置格状沙丘, 垄间地分布线形沙丘。

### 2.2 各分区复合纵向沙垄形态特征

各分区沙丘形态参数差异显著(图 3), 直观展现了沙漠不同区域沙丘的形态发育过程, 为探究沙丘形态演化机制提供数据支撑。脊线长度与间距变化范围大, 表明研究区沙丘纵向延伸与横向分布密度差异明显。高度平均值较高区域, 其分布范围亦相对更宽。这说明其发育沙丘类型多样。脊线走向的多样性和复杂性反映区域主导风况的空间变化。脊线长度(4 127~13 696 m)从西向东整体呈

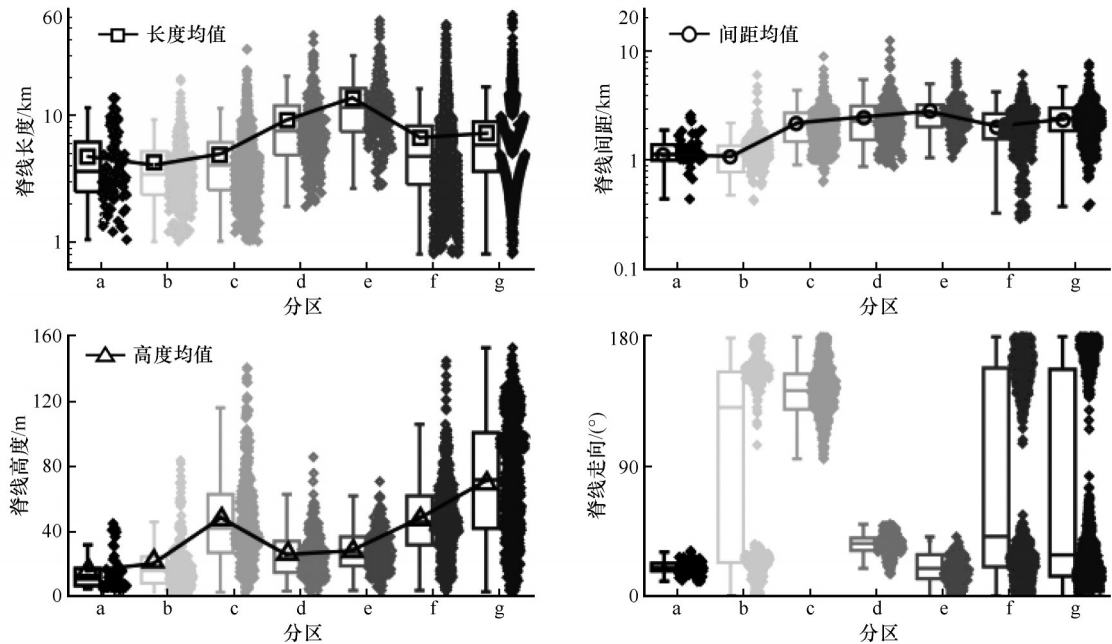


图3 各分区复合纵向沙垄形态参数统计

Fig.3 Morphological parameters of the compound longitudinal dunes in different regions of the study area

增长趋势,中部小于东部,且中部分布范围小于东部。间距(1 097~2 756 m)平均值相对一致,但各分区内差异明显,除靠近和田河附近的中部a、b区外(图3B)。高度平均值(16~71 m)自a区至g区呈明显递增趋势,c区之后增长较为显著,且分区内分布范围渐扩,说明从西南向东北沙丘发育规模或沙源供应增强(图3C)。a、d、e区脊线走向相对集中,f、g、b区分布范围较广(图3D)。

从空间分布来看,沙丘形态参数表现出明显的区域异质性(图4)。脊线长度呈中部长、边缘短的趋势(图4A),高值区(>33.73 km)分布在d区北部、e区、f区中部、g区西北部,低值区(<3.62 km)分布于近河地带a、b区,近山体和河流地带c区和f区东北部、g区西北部。间距高值区分布与脊线长度分布具有相似性,高值区主要位于d、e区及g区东南部。在g区东南部出现显著高值,可达7 660.84 m,表明该区域沙丘分布较为稀疏(图4B)。高度呈现由西南向东北递增变化,高值区达161.00 m,低值区仅0.22 m,g区高度显著高于其他区域(图4C),反映沙丘在垂直方向发育程度的空间变化。脊线走向整体以NE向为主,但在北部和东南部存在局部偏转(图4E),即脊线走向自南向北由东北风(NE)逐渐转向西北风(NW)。这反映出脊线受地形、气流等因素影响,走向具有复杂性与空间变异性。缺陷密度自沙漠外围向中心递减(0.05~17.1),

高值区集中于沙漠边缘尤其是近河流和山体的区域,其值大于0.50。而沙漠腹地多数单元缺陷密度较低,在0.23左右,指示其脊线连续性好,形态较为稳定(图4D)。

### 2.3 形态参数之间关系

沙丘形态参数可以反映沙丘发育的成熟度以及演化阶段<sup>[3]</sup>,也可以反映短时间内风沙活动强度和区域风况的变化程度<sup>[4]</sup>。脊线长度与间距之间存在较好相关关系( $R^2=0.64$ ),表明随着脊线长度的增加,沙丘间距有明显增大趋势。间距与高度之间存在弱相关关系( $R^2=0.22$ ),说明脊线长度对高度的解释力度有限,可能受局地沙源供应或风力调控更为显著。高度与脊线长度则无显著相关。各区域高度存在明显差异,脊线长度分布分散,导致两者之间无明显相关关系。这反映出形态参数以及不同区域之间存在明显分异,可能与沙丘形成动力条件、沙源供应等因素的空间差异有关。整体而言,脊线长度与间距具有较强的协同变化特征,暗示其形态发育受相似动力机制控制;而高度则表现出相对独立性,指示其受制于不同环境因子(图5)。

### 2.4 各分区风况

基于1980—2025年研究区四季风速与风向,春季整体风速较高( $2.44\pm 0.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),东部接近

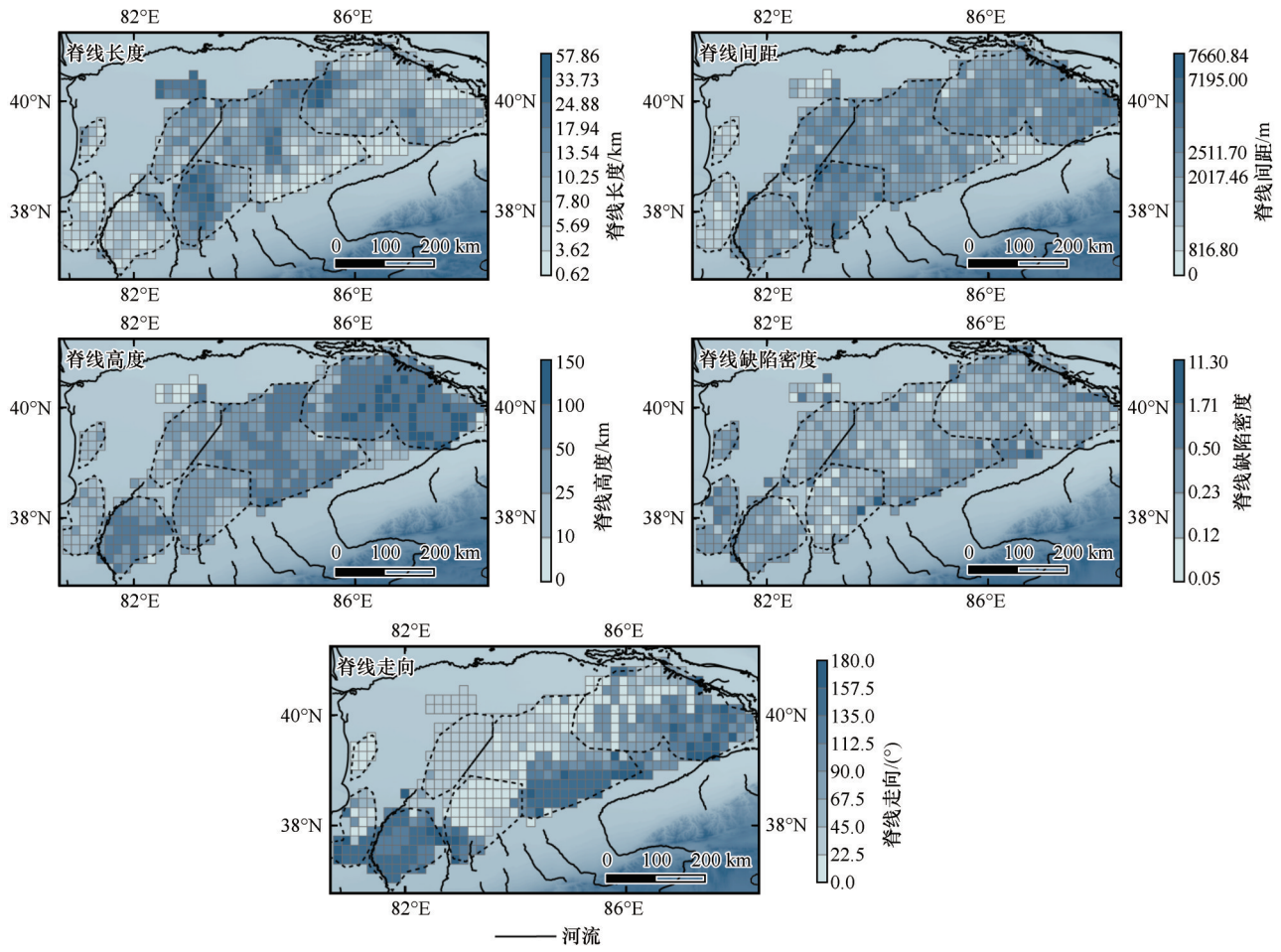


图 4 各分区复合纵向沙垄形态参数空间分布

Fig.4 Spatial distribution of the morphological parameters of compound longitudinal dunes in different regions of the study area

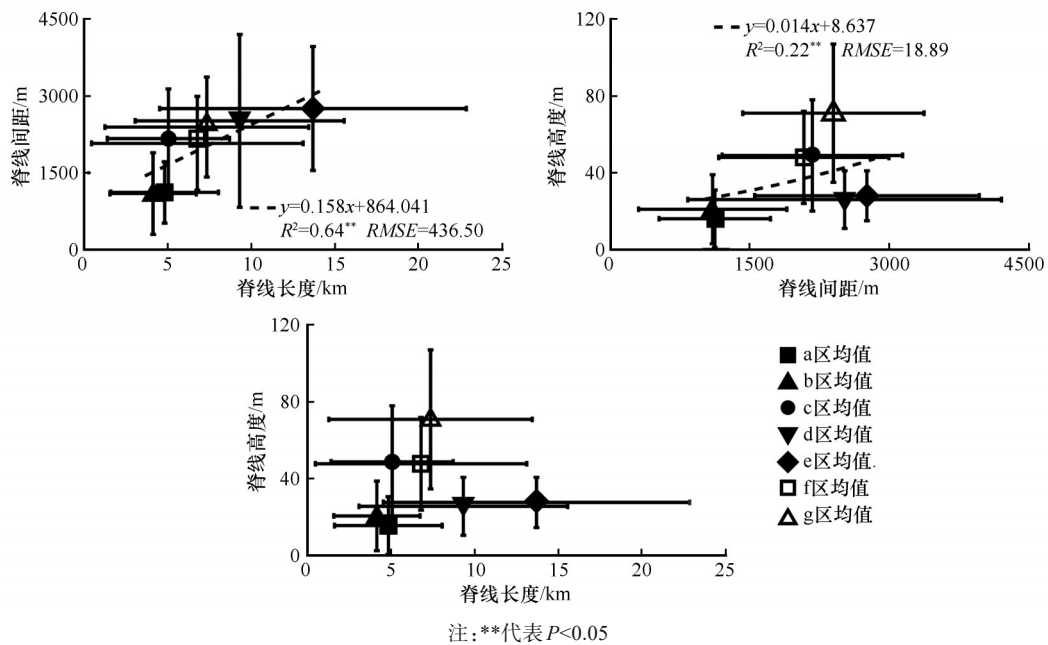


图 5 各分区复合纵向沙垄形态参数间关系

Fig.5 The relationship among the morphological parameters of compound longitudinal dunes in different regions of the study area

$4.77 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风向多为东北风,这一风向与沙丘脊线走向等形态特征可能存在关联(图6A)。夏季风速较春季增强( $2.84\pm 0.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),东部风速可达 $4.84 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,但空间差异缩小。风向仍以东北风为主,风力作用强度增加(图6B)。秋季风速开始降至 $2.25\pm 0.65 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,风速高值区范围缩小且最大值仅 $3.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。风向虽仍以东北风占优,但局部气流方向离散性增加,出现北部西北风向南转为东北风的

趋势,反映出大气环流影响发生变化(图6C)。冬季风速达全年最低( $1.63\pm 0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),风向分布分散,且主导风向与春、夏季差异显著,部分地区转为东北风或偏西风,风力作用显著减弱,对沙丘形态塑造等的影响也相应降低(图6D)。春、夏季稳定而强劲的东北和东风是驱动沙物质定向搬运、塑造复合纵向沙垄的根本动力;而秋、冬季相对微弱且风向多变的风况则对沙丘形态塑造作用有限。

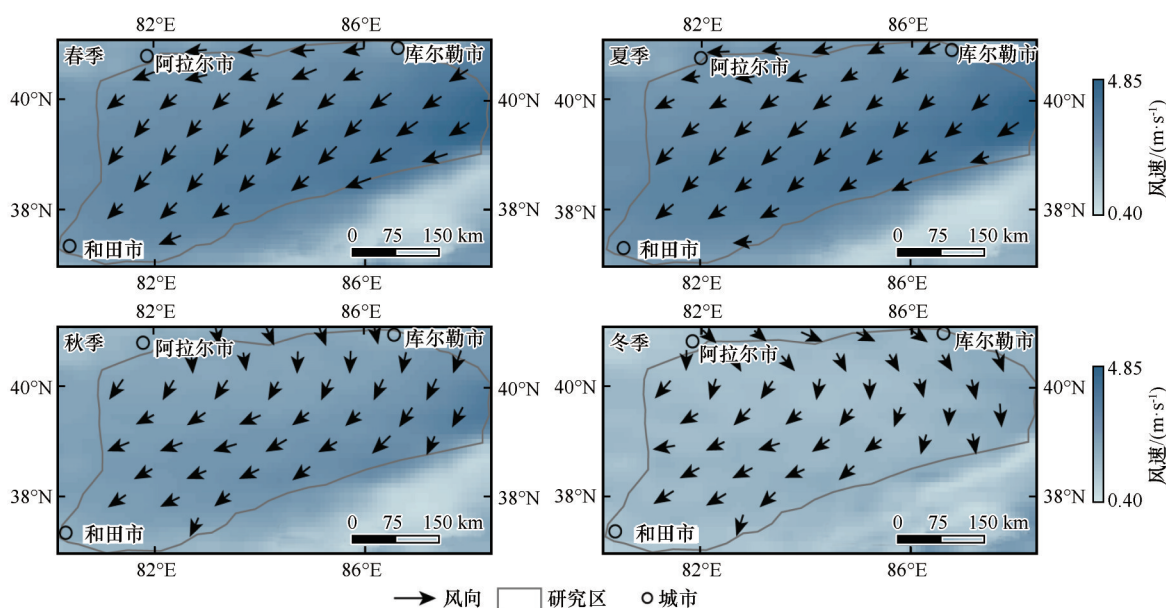


图6 1980—2025年各季节风速与风向分布

Fig.6 Distribution of the wind speed (WS) and wind direction (WD)

### 3 讨论

风沙地貌的形态塑造与演化受控于风动力、沙源供给、下伏地形、水分、植被状况等多因子耦合<sup>[31]</sup>,且主导因素随尺度推移而更迭。考虑到研究区位于极端干旱区的流动沙丘,水分与植被可忽略不计。本研究系统剖析风况、沙源及其交互效应对复合纵向沙垄形态分异与地貌格局的驱动机制。

#### 3.1 风况对沙丘形态的影响

风是沙丘形态形成与演化的主要驱动力<sup>[32]</sup>。风向影响脊线走向与延伸长度,决定形态特征<sup>[33-34]</sup>;风速影响移动速度与高度<sup>[35]</sup>。研究区盛行风以东北和偏东风为主,风速呈空间梯度变化,即东部及南部部分区域达 $4.85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,西部及北部约 $0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (图7A)。从空间格局来看,脊线走向与风向夹角呈现显著空间规律(图7B):低值区( $0^\circ\sim 20^\circ$ )位于沙漠腹地及东北部,脊线走向与合成输沙方向高度一

致,促使脊线延长,间距拓宽,反映风况对沙丘形态的一级控制。中值区( $40^\circ\sim 60^\circ$ )主要沿克里雅河下游及塔里木河周边流域呈带状分布,水文改造或下垫面变化弱化风力主导性,致脊线长度与间距变化不显著。高值区( $80^\circ\sim 90^\circ$ )则零星分布于沙漠西南缘山前地带及局部干涸湖盆,脊线走向与盛行风近乎垂直,或受地形阻挡、局地环流扰动影响,脊线长度与间距较小。综上,从空间耦合角度证实风况是控制脊线走向的首要因素,但局地环境因子的扰动作用不可忽视。该发现深化了对干旱区风沙地貌风力主导-多因子协同机制的认知。

输沙势方向影响沙丘形态,输沙势强度影响沙丘高度以及迁移速率<sup>[36]</sup>。输沙势( $DP$ )与合成输沙势( $RDP$ )的空间分布相似,均表现为由西北向东南逐渐增强的趋势(图8A、8B),高值中心分布于沙漠东南缘的民丰-且末一带(可达 $42.15 \text{ m}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ),而低值区则位于沙漠西北部(接近 $0.01 \text{ m}^2\cdot\text{a}^{-1}$ ),与Liu等<sup>[12]</sup>对该沙漠输沙势分析较为一致。与此同时, $DP$

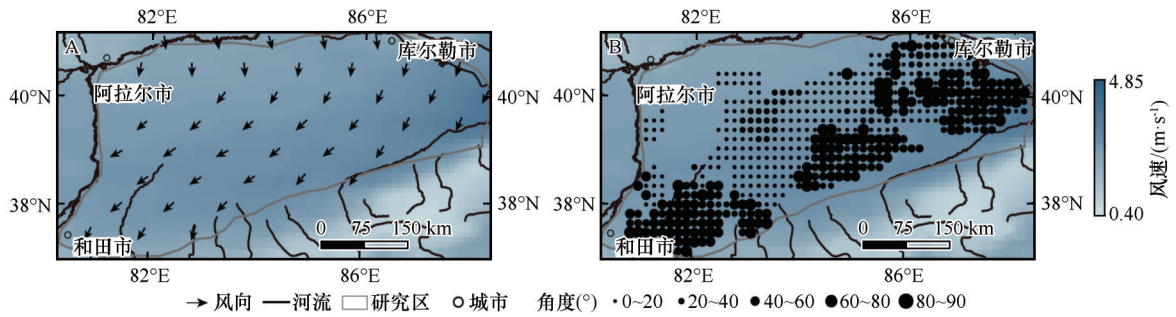


图7 1980—2025年平均风速与风向(A)及脊线走向与风向夹角空间分布(B)

Fig.7 Average wind speed and direction from 1980 to 2025 (A), and spatial distribution of the angle between crestlines and wind direction(B)

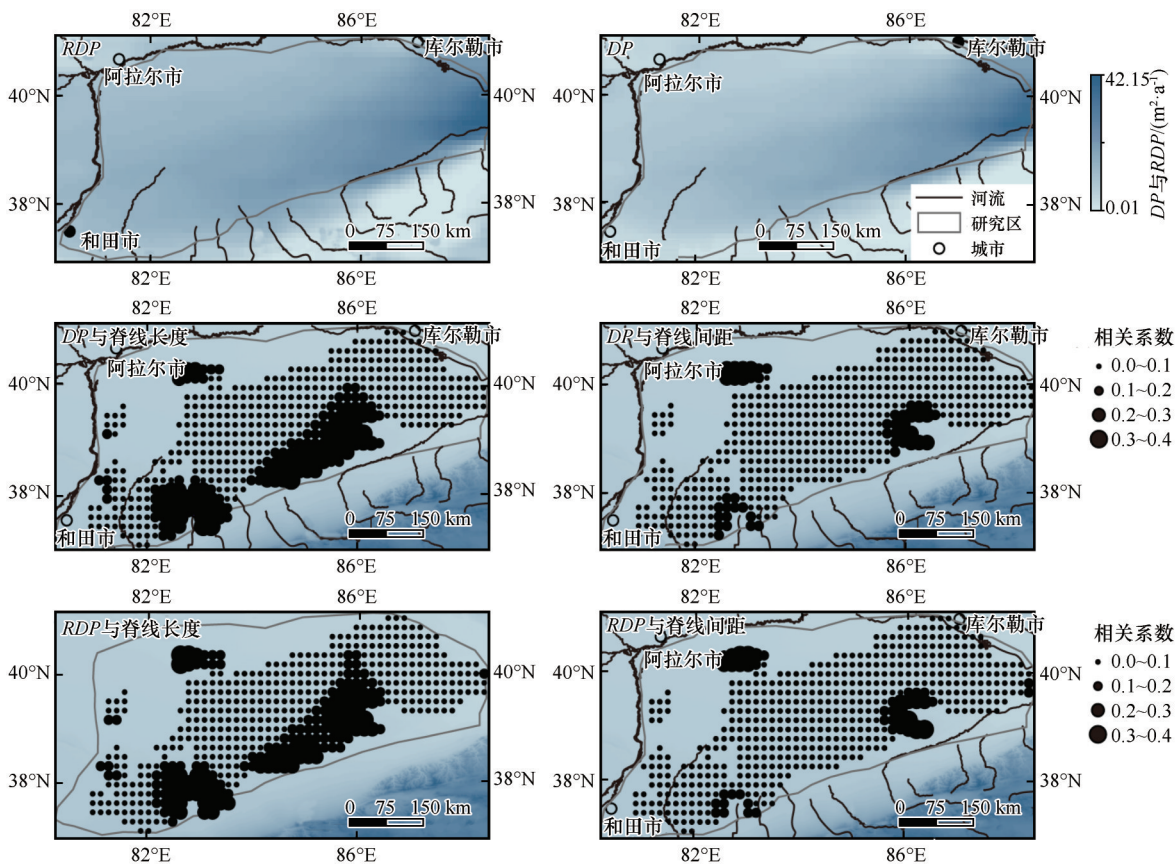


图8 输沙势参数及其与沙丘形态参数之间相关系数的空间分布

Fig.8 Spatial distribution of DP, RDP, and their regression coefficients with morphological parameters based on GWR model

和RDP高值区与脊线长度和间距变化在沙漠南缘部分地区吻合(图8C、D、E、F),相关系数在0.2~0.4;在沙漠腹地北缘和东北缘主要受到风向影响,相关系数小于0.1。这说明DP高值是影响脊线长度与间距变化的主导因素,这种风动力配置有利于沙粒持续搬运与堆积,从而促进脊线长度和间距发育(图4A、4B)。而沙漠腹地北缘和东北缘主要受除DP外其他因素影响,例如受到风向影响。然而,高度高值区(图4C)与DP和RDP高值区存在空间偏

移,表明沙源供给(如河流冲积物分布)可能是比风动力更关键的因素。

### 3.2 沙源对沙丘形态的影响

沙源可用性是影响沙丘形态的重要因素<sup>[37]</sup>。沙源可划分为远源输移与局地供给两类:远源沙物质主要源于高山碎屑经河流搬运,故以至河流距离(D)作为其替代指标;局地沙源则以沉积物厚度(EST)表征。研究区沉积物厚度空间差异显著(图9A),沙漠

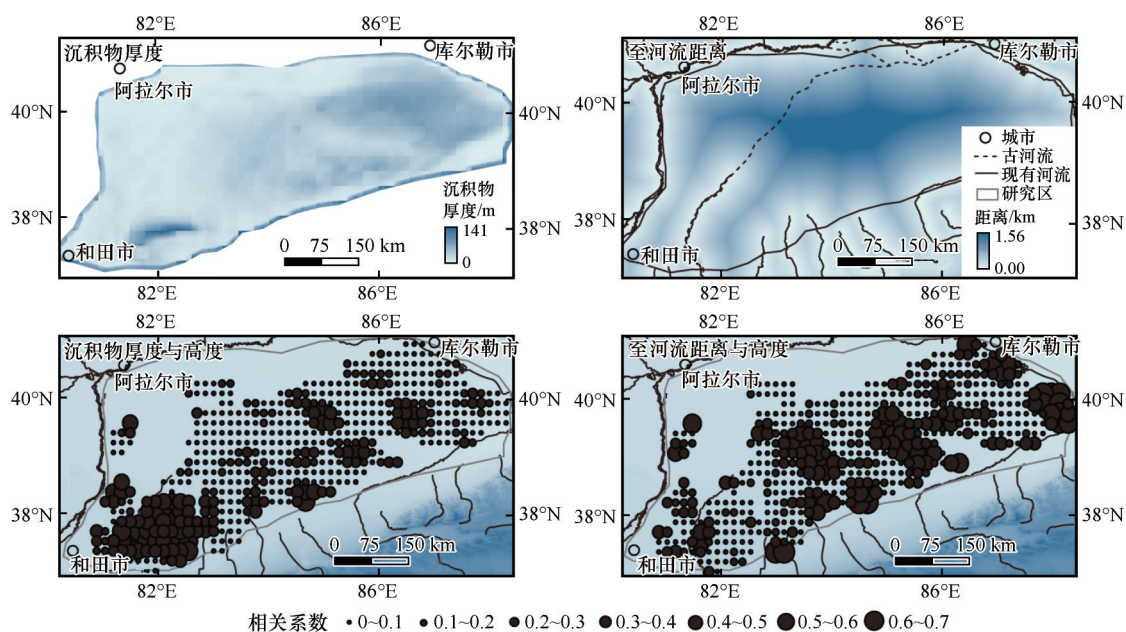


图9 沉积物厚度和至河流距离及与沙丘脊线高度相关系数空间分布

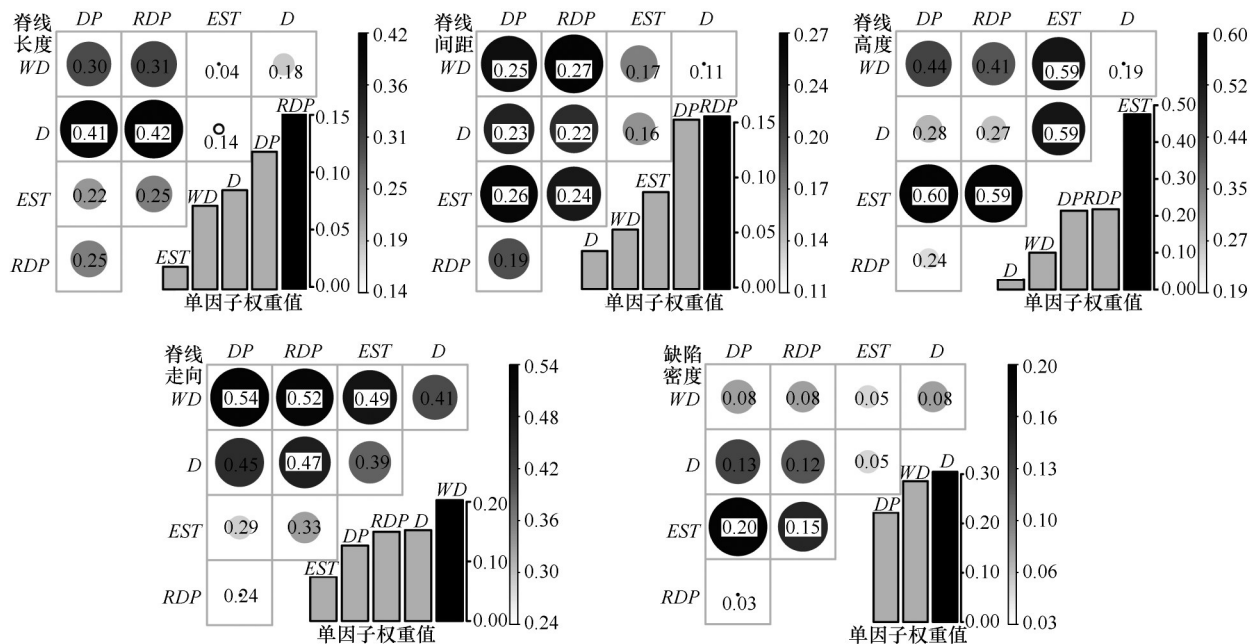
Fig.9 Spatial distribution of sand source, distance to rivers, and their relationships with height

东南部的  $EST > 100$  m, 指示该区域为历史时期的物汇中心; 而西北部  $EST$  普遍低于 20 m, 反映基底抬升或侵蚀作用主导。至河流距离分布 (图 9B) 表明现代河流沿岸形成近河低值带, 而古河道遗迹周边出现中远距离高值区。GWR 模型回归系数表明: 沉积物厚度与脊线高度正相关关系具空间异质性, 北民丰隆起及中东部厚沉积区 (系数 0.5~0.7) 相关性最强, 薄沉积区相关性弱 (图 9C); 至河流距离与脊线高度正相关关系同样异质, 东部近现代河、中部近古河区 (系数 0.6~0.9) 相关性显著, 西部远河区相关性弱 (图 9D)。

沉积物厚度和至河流距离对脊线高度的影响具显著空间异质性。厚沉积且近河区更有利于沙丘发育, 因充足沉积物提供物质基础, 近河区域水分条件间接促进沙丘发育。这与 Li 等<sup>[23]</sup> 的研究表明盆地下方沉积物为塔克拉玛干沙漠东部巨型沙丘提供物源和河流携带的高山碎屑物质成为沙丘不断发育的重要物质来源的结果一致。而单一因素如厚沉积或近河区, 也会导致脊线高度增加 (图 4C), 如北民丰隆起和中部古河流分布区, 相关系数 0.6~0.7 佐证此结论。而薄沉积、远河区, 因物质基础相对不足, 脊线高度低, 如沙漠中部远河区沙丘高  $< 20$  m, 相关系数  $< 0.2$  (图 9C、D)。这种空间异质性反映了沉积物分布、河流作用与沙丘发育之间复杂的空间耦合关系, 为深入理解研究区沙丘地貌形成演化机制提供了重要依据。

### 3.3 多因子交互对地貌格局的影响

风沙地貌形成与发育受到多种因素的影响, 本研究以输沙势、合成输沙势、起沙风风向、沉积物厚度以及至河流距离的重分类结果为自变量, 脊线长度、间距、高度、脊线走向和缺陷密度为因变量, 采用地理探测器分析其驱动和交互作用 (图 10,  $P < 0.05$ )。RDP 对脊线长度 ( $q=0.15$ ) 和脊线间距 ( $q=0.16$ ) 影响最大,  $EST$  对脊线高度影响最大 ( $q=0.49$ ), 风向对脊线走向影响最大 ( $q=0.31$ ), 至河流距离对脊线缺陷密度影响最大 ( $q=0.31$ )。单因子影响弱于双因子交互作用。其中, RDP 与至河流距离对脊线长度影响最大 ( $q=0.42$ ), RDP 与风向对脊线间距影响最大 ( $q=0.27$ ),  $EST$  与 DP 对脊线高度影响最大 ( $q=0.60$ ), 风向与 DP 对脊线走向影响最大 ( $q=0.54$ ), DP 与  $EST$  对脊线缺陷密度影响最大 ( $q=0.20$ )。正是由于主导因素的综合作用, 使得脊线长度与间距存在相关关系, 而脊线高度与间距存在弱相关关系。这与 Ewing 等<sup>[3]</sup> 和 Li 等<sup>[5]</sup> 对简单沙丘的研究不同。这主要是由于本研究是复合纵向沙垄, 非简单沙丘; 并且脊线间距与长度主导因素为 RDP, 而脊线高度主要受到  $EST$  影响, 所以相关关系不明确。在空间上表现为沙漠腹地因  $EST$  薄、距河远, 导致沙源可用性低, 高度低, 脊线长度及间距与



注:DP为输沙势,RDP为合成输沙势,WD为起沙风风向,EST为沉积物厚度,D为至河流距离

图10 各变量对沙丘形态参数影响的q值

Fig.10 The q values among the variables and morphological parameters of compound longitudinal dunes

风向关系显著;近河及近山体区域因EST厚、属RDP高值区,导致高度大,脊线长度及间距与输沙势关联密切。

#### 4 结论

塔克拉玛干沙漠中东部复合纵向沙垄形态参数是多因素综合作用的结果,可以表征沙丘形成发育与演化过程。

复合纵向沙垄地貌格局空间分异显著。东部沙丘脊线短、间距宽、高度高、缺陷密度低;中部沙丘脊线长、间距窄、高度低、缺陷密度低。此格局由风况、沙源供给与下垫面性质共同作用。

沙丘形态参数存在关联性。脊线长度与间距呈显著相关( $R^2=0.64$ ),脊线间距与高度呈弱相关( $R^2=0.22$ ),脊线长度与高度无显著关系,各区域内部因主导因素差异,存在局部变化。

沙丘地貌格局是风动力、沙源可用性等多因子协同调控,单因素影响弱于多因素。合成输沙势(RDP)与物源综合调控脊线长度、合成输沙势(RDP)与风向综合作用脊线间距、输沙势(DP)与沉积物厚度(EST)的综合作用对脊线高度影响最大。

该研究基于高精度卫星影像数据定量揭示该区域中东部复合纵向沙垄空间分布及主导成因,完

善塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究体系。未来需加强对复合纵向沙垄其上叠置次级简单沙丘的精细研究,以深化其形成演化机制。

#### 参考文献:

- [1] Hallet B. Spatial self-organization in geomorphology from periodic bedforms and patterned ground to scale in variant topography[J]. Earth-Science Reviews, 1990, 29(1/4): 57-75.
- [2] Werner B T. Eolian dunes; computer simulations and attractor interpretation[J]. Geology, 1995, 23(12): 1107-1110.
- [3] Ewing R C, Kocurek G, Lake L W. Pattern analysis of dune-field parameters [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2006, 31(9): 1176-1191.
- [4] 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.
- [5] Li C, Dong Z B, Cui X J, et al. Pattern analysis of simple transverse dunes in China's Qaidam Basin, North of the Kunlun Mountains[J]. Environmental Earth Science, 2016, 75: 729.
- [6] Liu J, Liu Y, Wan W H, et al. Orbital and in situ observation of transverse aeolian ridges at Zhurong landing site[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2023, 128: JE007857.
- [7] Zheng Z J, Yu J S D, Zhang X Y, et al. Development of a 30 m resolution global sand dune/sheet classification map(GSDS30) using multi-source remote sensing data[J]. Remote Sensing of Environment, 2024, 302: 113973.
- [8] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981.
- [9] 凌裕泉. 塔克拉玛干沙漠的流场特征与风沙活动强度的关系

- [J]. 中国沙漠, 1988, 8(2): 28-40.
- [10] 李振山, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠起沙风况[J]. 中国沙漠, 1999, 19(1): 43-45.
- [11] 俎瑞平, 屈建军, 方海燕, 等. 塔克拉玛干沙漠风况特征研究[J]. 干旱区地理, 2005, 28(2): 167-170.
- [12] Liu Z Y, Dong Z B, Zhang Z C. Spatial and temporal variation of the near-surface wind regimes in the Taklimakan Desert, Northwest China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2019, 138: 433-447.
- [13] 王训明, 董治宝, 屈建军. 塔克拉玛干沙漠简单横向沙丘形态学示量特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2002, 38(6): 110-116.
- [14] 张翰之, 鹿化煜, 戈双文, 等. 中国北方沙漠/沙地锆石形态特征及其对物源的指示[J]. 第四纪研究, 2013, 33(2): 334-344.
- [15] 王宁波, 李生字, 王海峰, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地垄间地上覆沙丘形态的空间变化特征及其成因[J]. 干旱区地理, 2014, 7(1): 89-96.
- [16] Song Q, Gao X, Lei J G, et al. Spatial distribution of sand dunes and their relationship with fluvial systems on the southern margin of the Taklimakan Desert, China [J]. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 2019, 10(1): 2408-2428.
- [17] Zhang Z Y, Han L Y, Wang S Q, et al. Provenance of Taklimakan Desert aeolian sediments based on rare earth elements signatures [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2025, 50: e70105.
- [18] Chen L, Zhang F. Rees spatial distribution of dune sands reveals differences of regional surface processes in the Taklamakan Desert [J]. *Catena*, 2025, 254: 108956.
- [19] 张德二. 我国历史时期以来降尘的天气气候学初步分析[J]. 中国科学(B辑), 1984, 14(3): 278-288.
- [20] 李恒鹏, 陈广庭. 塔克拉玛干沙漠腹地复合沙垄间新月形沙丘的逆向演变[J]. 中国沙漠, 1999, 19(2): 134-138.
- [21] 岳健, 雷加强, 穆桂金. 塔克拉玛干沙漠复合纵向沙垄区大尺度地貌格局初步研究[J]. 科学通报, 2008(增刊2): 159-168.
- [22] 刘鑫, 高鑫. 塔克拉玛干沙漠南缘新月形沙丘移动特征[J]. 干旱区研究, 2024, 41(4): 661-673.
- [23] Li H L, Gao X, Zhao Y C, et al. Geomorphology of mega-dunes in the eastern Taklimakan Desert [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2025, 35(6): 1329-1350.
- [24] Wang H, Jia X. Field observations of windblown sand and dust in the Taklimakan Desert, NW China, and insights into modern dust sources [J]. *Land Degradation Development*, 2013, 24(4): 323-333.
- [25] Danielson J J, Gesch D B. Global Multi-resolution Terrain Elevation Data 2010 (GMTED2010) [DS]. U.S. Geological Survey, 2011. <https://doi.org/10.5066/F7J38R2N>.
- [26] 管超, 哈斯额尔敦, 安晶, 等. 库布齐沙漠北部横向沙丘地貌格局的空间变异[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(增刊1): 13-22.
- [27] Sun W T, Gao X. Geomorphology of sand dunes in the Taklimakan Desert based on ERA5 reanalysis data [J]. *Journal of Arid Environments*, 2022, 207: 104848.
- [28] Ungar J E, Haff P K. Steady state saltation in air [J]. *Sedimentology*, 1987, 34(2): 289-299.
- [29] Iversen J D, Rasmussen K R. The effect of wind speed and bed slope on sand transport [J]. *Sedimentology*, 1999, 46(4): 723-731.
- [30] Hugenholtz C H, Barchyn T E. Spatial analysis of sand dunes with a new global topographic dataset: new approaches and opportunities [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35: 986-992.
- [31] Lancaster N. *The Geomorphology of Desert Dunes* [M]. London, UK: Routledge, 1995.
- [32] Bagnold R. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes* [M]. London, UK: Methuen, 1941.
- [33] McKee E D. Introduction to a study of global sand seas [M] // McKee E D, ed. *A Study of Global Sand Seas*. Virginia, USA: USGS, 1979.
- [34] Melton F A. A tentative classification of sand dunes: its application to dune history in the southern High Plains [J]. *Journal of Geology*, 1940, 48: 113-174.
- [35] Livingstone I, Warren A. *Aeolian Geomorphology: An Introduction* [M]. Essex, UK: Longman, 1996.
- [36] Zheng X J, Bo T L, Zhu W. A scale-coupled method for simulation of the formation and evolution of aeolian dune field [J]. *International Journal of Nonlinear Sciences and Numerical Simulation*, 2009, 10: 387-395.
- [37] Wasson R J, Hyde R. Factors determining desert dune type [J]. *Nature*, 1983, 304: 337-339.

## Geomorphic pattern and genesis of compound longitudinal dunes in the central-eastern Taklamakan Desert

Pan Kaijia<sup>1,2</sup>, Zhang Zhengcai<sup>3</sup>, Qian Guangqiang<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Ecological Safety and Sustainable Development in Arid Lands, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.School of Geography and Tourism / Key Laboratory of Qian Xuesen Deserticulture of Shaanxi Higher Education Institute, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China)

**Abstract:** The Taklamakan Desert is the largest desert in China and the second largest mobile desert globally, boasts diverse dune types. Typical compound longitudinal dunes are widely developed in its central-eastern region, exhibiting distinct spatial differentiation. However, systematic and in-depth studies on the morphological characteristics and formation mechanisms of these dunes remain insufficient. The key morphological parameters (e.g., crestline length, spacing, and defect density) of compound longitudinal dunes covering 186 000 km<sup>2</sup> in the study area were extracted to systematically analyze their macro-geomorphic pattern. Results show that compound longitudinal dunes in the eastern Taklamakan Desert present a pattern of short crestline, wide spacing, high height, and low defect density, while those in the central region feature long crestline, narrow spacing, low height, and low defect density. The geomorphic patterns of compound longitudinal dunes in the central-eastern region are mainly influenced by wind regime and sand source, with their weights varying by parameter. Crestline length is primarily controlled by the interaction between resultant drift potential (*RDP*) and distance to rivers ( $q=0.42$ ); the interaction between *RDP* and wind direction ( $q=0.27$ ) exerts the greatest impact on spacing; height variation is dominated by the interaction between drift potential (*DP*) and sediment thickness ( $q=0.60$ ); crestline orientation depends on the *DP* and wind direction ( $q=0.54$ ); and defect density relies on *DP* and *EST* ( $q=0.20$ ). This study deepens the understanding of the coupling mechanism between the morphology and process of compound longitudinal dunes at the macro-pattern level, enriches the research scope of aeolian geomorphology, supplements the research on the formation and evolution of compound longitudinal dunes, and provides a reference for aeolian disaster prevention and geomorphic regionalization.

**Key words:** Taklamakan Desert; compound longitudinal dunes; dune landform pattern; sediment potential; sand sources