

李爱敏,赵培臣,韩致文.基于三维数字模型的新月形沙丘移动轨迹拟合[J].中国沙漠,2024,44(2):48-56.

# 基于三维数字模型的新月形沙丘移动轨迹拟合

李爱敏<sup>1a</sup>, 赵培臣<sup>1b</sup>, 韩致文<sup>2</sup>

(1.菏泽学院 a.城市建设学院, b.数学与统计学院, 山东 菏泽 274015; 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)

**摘要:**在塔克拉玛干沙漠腹地的新月形沙丘演变监测区,运用华测 X90 GNSS 接收机 RTK 工作模式,获取精度为毫米级的高时空分辨率三维坐标数据。利用 CASS 9.0 和 ArcGIS 10.0 建立沙丘三维数字模型并对相邻监测期的三维数字模型进行叠加,在 AutoCAD 2010 中利用起点、端点和夹角三要素,对 8 个典型沙丘对应特征点移动轨迹曲线进行拟合。结果表明:在第 1、2 和第 3、4 监测期间,沙丘逆时针旋转角度分别为 33°~38°和 25.5°~30°,移动轨迹均为自 NE 指向 SW 且凸向 NW 的曲线,长度较大;在第 2、3 监测期间,沙丘顺时针旋转角度为 31°~37°,移动轨迹均为自 NE 指向 SW 且凸向 SE 或 SW 的曲线,方向不一,长度较小。测区 NNE、N 和 NNW 向有效起沙风与沙丘轴向线的北偏角 >30°,E 和 ENE 向有效起沙风与轴向线的南偏角 >30°时,沙丘出现逆时针或顺时针旋转,说明测区沙丘移动轨迹应为曲线而非直线,拟合结果与沙丘实际移动轨迹更吻合。新月形沙丘移动轨迹的拟合可为其他流动性沙丘移动轨迹拟合和正确获取移动距离和速度等第一手研究数据资料提供技术和方法支持,并可为改进和完善流动性沙丘移动速度计算公式,深入研究流动性沙丘移动速度和移动方向相关的诸多问题奠定基础。

**关键词:**塔克拉玛干沙漠;新月形沙丘;三维数字模型;移动轨迹拟合

**文章编号:** 1000-694X(2024)02-048-09

**DOI:** 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00122

**中图分类号:** P931.3

**文献标志码:** A

## 0 引言

新月形沙丘一般形成于有单向风或两相反方向风存在的区域,因平面形态似新月而得名。新月形沙丘是全球沙漠中分布最广泛和形态最简单的风沙地貌,其形成发育和演变机制等问题受到风沙地貌和风沙物理学界的普遍关注<sup>[1-6]</sup>。新月形沙丘为流动性沙丘,移动方向可指示地表物质的输移方向,移动速度可估算沙物质的输移量,可为防风固沙工程提供重要的参考指标。虽然目前在沙丘发育条件和发育模式、形态演变过程、表面气流与侵蚀堆积、沉积结构、风沙流结构与输沙率、沙丘移动规律等方面已取得重要研究进展,但有关新月形沙丘形态演变过程、移动速度、移动方向及其影响因素等诸多科学问题目前仍未达成共识<sup>[7-13]</sup>。

对沙丘移动距离和移动方向的已有研究,移动轨迹均采用直线,缺乏对沙丘实际移动轨迹的深入研究分析。按已有沙丘移动速度计算公式进行计

算,沙丘移动速度计算值和实测值有较大差异,表明沙丘移动速度计算公式还需进一步改进和完善。新月形沙丘移动轨迹拟合,可为进一步明确沙丘移动轨迹,正确获取沙丘移动距离和移动方向提供方法和技术支持,并为进一步改进和完善沙丘移动速度的计算公式奠定基础<sup>[13-20]</sup>。

本项研究在塔克拉玛干沙漠腹地选取典型新月形沙丘演变监测区,运用华测 X90 GNSS 接收机的 RTK 工作模式开展地形三维坐标详测,获得多期精度达毫米级的监测区三维坐标数据。应用地形地籍成图软件 CASS 9.0 和地理信息数据分析处理软件 ArcGIS 10.0,对三维坐标数据进行处理分析,在建立测区 DEM 的基础上,建立沙丘的三维数字模型并对相邻监测期的三维数字模型进行叠加,利用软件 AutoCAD 2010 中起点、端点和夹角三要素绘制弧线的方法,实现沙丘对应特征点移动轨迹曲线的拟合。以期对其他流动性沙丘移动轨迹拟合

收稿日期:2023-07-18; 改回日期:2023-09-02

资助项目:菏泽学院博士基金项目(XY19BS04);菏泽市社会科学规划课题(ZC-2022-2)

作者简介:李爱敏(1981—),女,山东鄄城人,博士研究生,从事风沙地貌与三维数字建模研究。E-mail: aiminliok@126.com

和正确获取移动距离和速度等第一手研究数据资料提供技术和方法支持,并为改进和完善流动性沙丘移动速度计算公式,深入研究流动性沙丘移动速度和移动方向相关的诸多问题奠定基础。

## 1 研究区概况及数据获取

### 1.1 研究区概况

新月形沙丘演变监测区位于塔克拉玛干沙漠腹地塔中联合站东部(39°15'N、83°42'E)高大纵向沙垄间地的典型新月形沙丘发育区<sup>[4,6]</sup>(图1),演变监测区域的面积约为6 700 m<sup>2</sup>。

测区位于塔克拉玛干沙漠石油公路沿线的垄间低地,新月形沙丘的空间尺度相对较小,其两翼指向主风向NE风的下风向,横剖面具有不对称斜

坡。测区36个新月形沙丘的主要形态参数均值显示,迎风坡角均值为07°23",背风坡角均值为27°31",沙丘高度均值1.238 m,宽度均值15.289 m,沙丘宽度约为高度的10倍,新月形沙丘形态较为典型<sup>[1,4]</sup>。

### 1.2 数据获取

在2015年4月下旬、2015年10月中旬、2016年3月上旬、2016年10月中下旬,分次对沙丘演变监测区共进行4期监测,三维坐标数据采用华测X90 GNSS接收机测量获得(图2)。GNSS接收机由基准站、移动站、数据链、控制软件构成,基准站实时通过数据链以无线电台方式将差分改正信息发送给移动站,移动站接收后即时进行解算处理,获得高精度空间坐标数据。

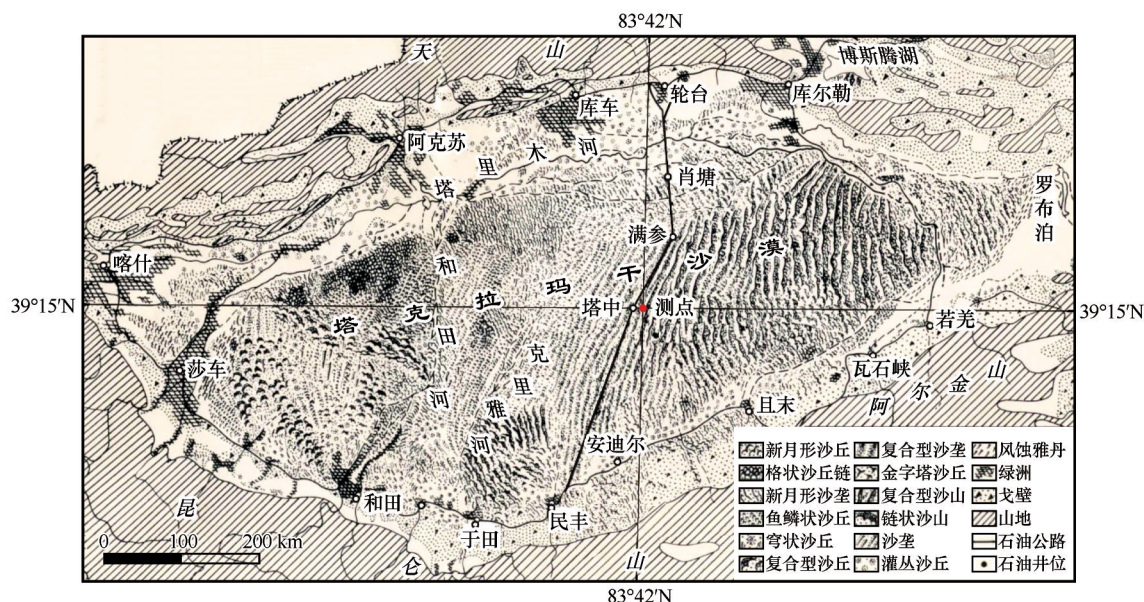


图1 新月形沙丘演变监测区位置<sup>[7]</sup>

Fig.1 The location of barchan dunes survey zone<sup>[7]</sup>

选择GNSS接收机的RTK(Real Time Kinematic)工作模式开展三维坐标测量。RTK是基于载波相位观测值的实时动态定位技术,能够实时提供测点在指定坐标系中的三维坐标,具有精度高、作业方便、不受通视条件限制的优点<sup>[21-23]</sup>。

利用华测GNSS接收机测量沙丘表面坐标时,移动站坐标系选用北京54坐标系,测点坐标均基于基准站起算。基准站迁移或在未知点重启后,均可引起起算坐标的变化,为确保基站起算坐标的一致性,基准站迁移或在未知点重启后,均需进行基站平移,以确保测量的移动坐标都具有统一的起算坐

标<sup>[23-25]</sup>。坐标测量时先安装并设置X90 GNSS接收机,确定监测区4个边界点A、B、C和D的位置,选取A点作为基准点,B点作为检测点检验基站平移的准确性(图3)。基于3个不共线点可定面的原理,利用基准站起算点、基准点A和检测点B实现测区的精确定位。沙丘表面测量路径沿图2所示的等高线分布,相邻测点间距约50 cm,在地形陡变部位加大测点密度。

测量时由于手簿和测杆自身重量的影响,测杆陷进沙面的深度难以精确控制,测量者的踩踏也会对沙丘自然表面造成轻微破坏,均可引起测点坐标

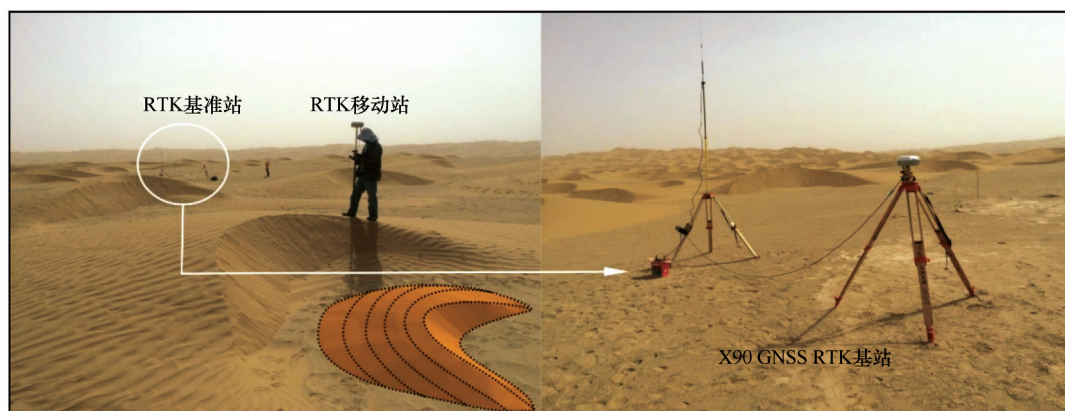


图2 新月形沙丘数据采集现场

Fig.2 Photos showing the data collection and the surroundings

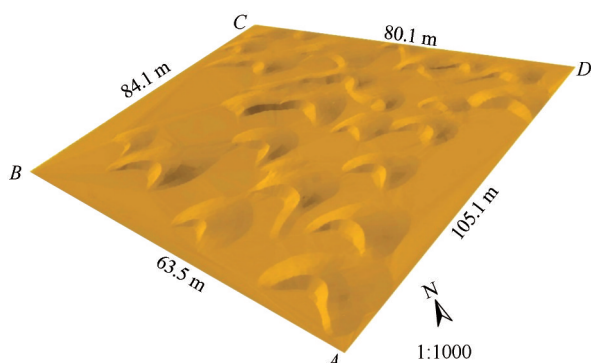


图3 监测区三维数字模型

Fig.3 The three-dimensional digital model of the monitoring area

与实际坐标的误差,影响测量精度。为降低测量误差,在测杆下端固定一块直径5 cm、厚度0.5 cm的圆形橡胶垫,尽量避免测杆下端陷入沙面,同时尽可能使测点避开踩踏过的位置。

## 2 基于三维数字模型的沙丘移动轨迹拟合

### 2.1 沙丘三维数字模型的建立

将测量获取的三维坐标数据导出为Dat格式,利用CASS9.0展开高程点并绘制边界线,在建立沙丘数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)基础上,绘制整个测区等高距为0.005 m,单个沙丘等高距为0.001 m的等高线。然后,根据测区位置,在ArcMap 10选用北京54坐标系中高斯-克吕格3°带分带中的第28投影带对沙丘等高线定义投影。单个沙丘三维数字模型建立的具体步骤如图4所示,整个测区三维数字模型(图3)的建立与单个沙丘相似,只是不需要进行栅格裁剪<sup>[26-27]</sup>。



图4 单个沙丘三维模拟技术路线

Fig.4 Technical routes for three-dimensional numerical simulation of a single barchan dune

把定义投影后的Dwg格式的等高线导出为Shp格式并建立不规则三角网(Triangular Irregular Network, TIN)。为进一步简化数据算法,便于数据的裁剪和平滑,把TIN格式数据转换为能表现高程变化细节、分析处理算法易于实现且拓扑关系简单的栅格数据<sup>[28-29]</sup>。利用边界矢量数据对栅格数据进行裁剪,并利用焦点统计工具对裁剪栅格图像进行平滑处理,消除图像存有的“噪音”像元。最后,把栅格数据转换为TIN并添加进ArcScene 10,实现测区和单个沙丘的三维数字模型的创建<sup>[30-32]</sup>(图3)。

2.2 沙丘移动轨迹的拟合

新月形沙丘作为一种流动性沙丘,在风力等多种因素的共同作用下始终处于运动状态。本文以测区典型沙丘 D3 为例,建立沙丘 4 个监测期三维数字模型并对相邻测期的三维数字模型进行叠加,在 AutoCAD 2010 中利用起点、端点和夹角三要素,实现沙丘 D3 对应特征点移动轨迹曲线的拟合,具体拟合技术路线如图 5 所示。



图 5 沙丘移动轨迹拟合技术路线  
Fig.5 Technical routes for moving trajectory fitting of barchan dune

2.2.1 第 1、2 监测期间沙丘 D3 移动轨迹的拟合

对典型沙丘 D3 第 1、2 监测期的三维数字模型进行叠加并绘制移动轨迹图(图 6),在第 1 次监测的三维数字模型上选取 A(左翼前端点)、C(右翼前端

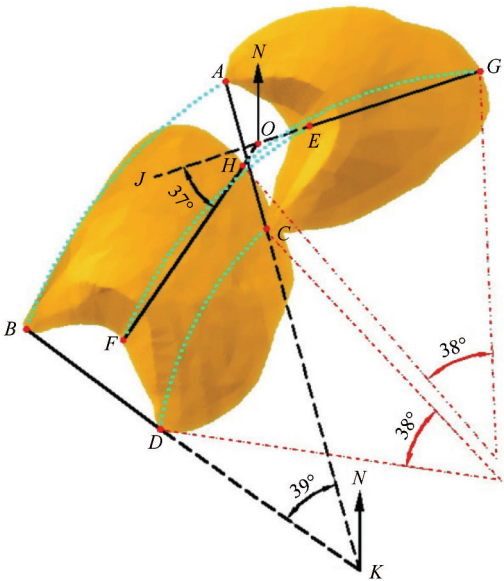


图 6 第 1、2 监测期间典型沙丘 D3 移动轨迹  
Fig.6 Movement path for the typical barchan dune D3 between first and second monitoring period

点)、G(沙丘走向线迎风坡端点)和 E(沙丘走向线背风坡端点)4 个特征点,在第 2 次监测的三维数字模型上选取相对应的 4 个特征点 B、D、H 和 F。第 1、2 监测期间,点 G 移动到点 H,点 E 移动到点 F,点 A 移动到点 B,点 C 移动到点 D(图 6)。

在此监测期间,沙丘 D3 走向线由 GE 变为 HF,走向线方位角由  $\angle NOJ$  变为  $\angle NOF$ ,逆时针旋转变小约  $37^\circ$ 。两翼前端点连线由 AC 变为 BD,两翼前端点连线方位角由  $\angle NKA$  变为  $\angle NKB$ ,逆时针旋转变小约  $39^\circ$ 。沙丘 D3 特征点自 NE 向 SW 移动的同时,自身发生逆时针旋转。为使典型沙丘 D3 任意对应点旋转角度具有统一性,选取  $37^\circ$  和  $39^\circ$  的均值  $38^\circ$  作为任意对应点的旋转角度值。将沙丘 D3 第 1、2 监测期任意两特征对应点为起点和端点,对应点旋转角度为夹角,利用 AutoCAD 2010 中起点、端点和夹角三要素拟合弧线的方法,实现沙丘对应特征点移动轨迹的拟合。

2.2.2 第 2、3 监测期间沙丘 D3 的移动轨迹拟合

典型沙丘 D3 三维数字模型的叠加结果表明,第 2、3 监测期间,沙丘上特征点 A 移动到 C, B 移动到 D, E 移动到 G, F 移动到 K(图 7)。沙丘走向线由 AB 变为 CD,走向线方位角由  $\angle NAB$  变为  $\angle NAH$  ( $AH \parallel CD$ ),顺时针旋转变大约  $33^\circ$ 。两翼前端点连线由 EF 变为 GK,两翼前端点连线方位角由  $\angle NKJ$  变为  $\angle NKG$  ( $EF \parallel JK$ ),顺时针旋转变大约  $35^\circ$ 。为使沙丘 D3 上任意对应点旋转角度具有统一性,选取  $33^\circ$  和  $35^\circ$  的均值  $34^\circ$  作为任意对应点的旋转角度。利用前述对应特征点移动轨迹的拟合方法,完成第 2、3 监测期间沙丘 D3 上对应特征点移动轨迹的拟合。

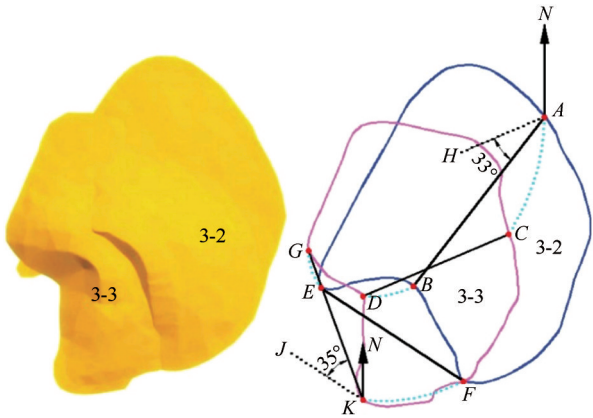


图 7 第 2、3 监测期间典型沙丘 D3 移动轨迹  
Fig.7 Movement path for the typical barchan dunes D3 between second and third monitoring period

### 2.2.3 第3、4监测期间沙丘D3的移动轨迹拟合

典型沙丘D3三维数字模型的叠加结果表明,第3、4监测期间,特征点A移动到B,C移动到D,G移动到H,E移动到F(图8)。沙丘走向线由GE变

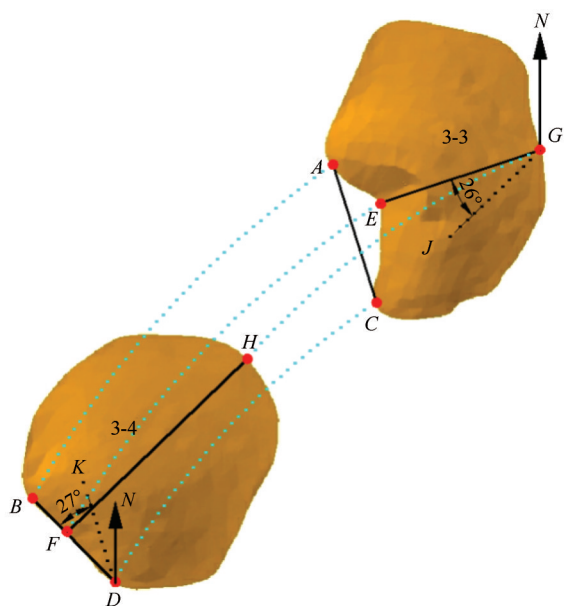


图8 第3、4监测期间典型沙丘D3移动轨迹

Fig.8 Movement path for the typical barchan dune D3 between third and fourth monitoring period

为HF,走向线方位角由 $\angle NGE$ 变为 $\angle NGJ$ ( $GJ//HF$ ),逆时针旋转变小约 $26^\circ$ 。两翼前端点连线由AC变为BD,两翼前端点连线方位角由 $\angle NDK$ 变为 $\angle NDB$ ( $DK//AC$ ),逆时针旋转变小约 $27^\circ$ 。为使沙丘D3上任意对应点旋转角度具有统一性,选取 $26^\circ$ 和 $27^\circ$ 的均值 $26.5^\circ$ 作为任意对应点的旋转角度。按照上述沙丘对应特征点移动轨迹的拟合方法,完成第3、4监测期间沙丘对应特征点移动轨迹的拟合。

### 2.2.4 其他典型沙丘移动轨迹拟合

利用上述典型沙丘D3移动轨迹拟合的方法和技术路线,对测区编号为D1、D2和D4~D8的7个典型沙丘在ArcGIS中建立三维数字模型并对相邻监测期的三维数字模型进行叠加,并在AutoCAD 2010中利用起点、端点和夹角三要素拟合弧线的方法,实现沙丘对应特征点移动轨迹的拟合<sup>[33-35]</sup>,拟合轨迹的特征如表1所列。由表1可知,第1、2和第3、4监测期间,典型沙丘在前移的同时自身均发生逆时针旋转,而在第2、3监测期间,沙丘在前移的同时自身发生顺时针旋转,和上述典型沙丘D3的移动旋转特性一致。新月形沙丘自身旋转角度的出现,说明沙丘移动轨迹并非直线,而是曲线。

表1 7个典型沙丘相邻监测周期移动轨迹拟合特征

Table 1 The moving trajectory fitting characteristics of seven typical barchan dunes between adjacent measurement periods

监测期间	拟合轨迹特征	沙丘编号						
		D1	D2	D4	D5	D6	D7	D8
第1、2	走向线旋转角度	$32^\circ$	$35^\circ$	$35^\circ$	$36^\circ$	$32^\circ$	$32^\circ$	$33^\circ$
	翼端点连线旋转角度	$34^\circ$	$37^\circ$	$36^\circ$	$40^\circ$	$35^\circ$	$39^\circ$	$36^\circ$
	沙丘旋转角度	$33^\circ$	$36^\circ$	$35.5^\circ$	$38^\circ$	$33.5^\circ$	$35.5^\circ$	$34.5^\circ$
	沙丘旋转方向	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针
第2、3	走向线旋转角度	$35^\circ$	$34^\circ$	$35^\circ$	$35^\circ$	$32^\circ$	$32^\circ$	$33^\circ$
	翼端点连线旋转角度	$36^\circ$	$37^\circ$	$39^\circ$	$34^\circ$	$34^\circ$	$30^\circ$	$34^\circ$
	沙丘旋转角度	$35.5^\circ$	$35.5^\circ$	$37^\circ$	$34.5^\circ$	$33^\circ$	$31^\circ$	$33.5^\circ$
	沙丘旋转方向	顺时针	顺时针	顺时针	顺时针	顺时针	顺时针	顺时针
第3、4	走向线旋转角度	$31^\circ$	$28^\circ$	$25^\circ$	$28^\circ$	$25^\circ$	$24^\circ$	$24^\circ$
	翼端点连线旋转角度	$29^\circ$	$30^\circ$	$29^\circ$	$30^\circ$	$30^\circ$	$29^\circ$	$27^\circ$
	沙丘旋转角度	$30^\circ$	$29^\circ$	$27^\circ$	$29^\circ$	$25.5^\circ$	$26.5^\circ$	$25.5^\circ$
	沙丘旋转方向	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针	逆时针

## 3 沙丘移动轨迹拟合结果和影响因素

### 3.1 沙丘移动轨迹拟合结果

由典型沙丘D1~D8第1、2和第3、4监测期间对

应特征点移动轨迹的拟合结果可知(图6、8,表1),对应特征点移动轨迹的拟合曲线 $\hat{AB}$ 、 $\hat{CD}$ 、 $\hat{EF}$ 和 $\hat{GH}$ 几乎呈平行状态,曲线自NE指向SW且凸向NW,轨迹较长,移动较快。沙丘对应特征点前移的

同时发生逆时针旋转,旋转角度为 $33^{\circ}\sim 38^{\circ}$ 或 $25.5^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 。

由第2、3监测期间典型沙丘移动轨迹拟合结果可知(图7,表1),在此期间,沙丘自NE向SW缓慢移动,表面4个对应特征点的移动轨迹曲线 $\widehat{EG}$ 、 $\widehat{FK}$ 、 $\widehat{BD}$ 和 $\widehat{AC}$ 较为凌乱,曲线凸向SE或SW,方向不一。此外,对应特征点前移的同时发生顺时针旋转,旋转角度介于 $31^{\circ}\sim 37^{\circ}$ 。沙丘在此期间的移动,几乎可理解为以左翼前端点为圆心的顺时针旋转运动,右翼端点的移动速度远远大于左翼端点,轨迹长度较短,移动速度较慢。

在第1、2和第3、4监测期间,沙丘表面对应特征点均发生逆时针旋转,而在第2、3监测期间,对应特征点发生顺时针旋转。如沙丘移动轨迹为直线,沙丘的前移应是在直线运动轨迹上的位置改变,自身不会发生旋转。沙丘自身旋转角度的出现,说明沙丘移动轨迹应为曲线而非直线,拟合结果与沙丘实际移动轨迹更为吻合。

### 3.2 沙丘移动轨迹影响因素

沙丘自NE向SW移动的同时,自身不断顺时针或逆时针旋转,使其移动轨迹为曲线而非直线。风况是引起新月形沙丘移动的动力因素<sup>[7]</sup>,沙丘移动的总进程与测区四季ENE、NE和E向主起沙风的下风向一致<sup>[14-15]</sup>(图9)。第1、2和第3、4监测期间分别为5—9月和4—9月,测区以春、秋和夏季为主。

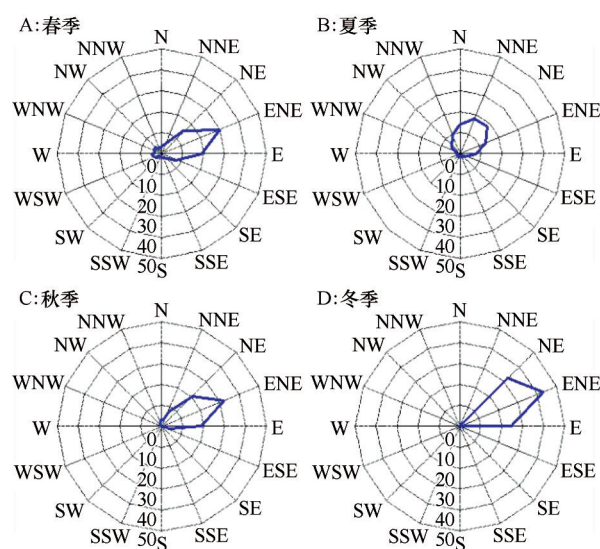


图9 2015—2016年塔中地区四季起沙风玫瑰图<sup>[24]</sup>

Fig.9 Sand-moving wind rose map for four seasons in central tarim basin, 2015-2016<sup>[24]</sup>

春、秋季测区以ENE、NE和E向起沙风为主,而夏季ENE、NE及E方向起沙风所占频率较大,且N、NNE及NNW方向起沙风所占频率亦高达41.3%。当夏季NNE、N和NNW向有效起沙风与沙丘轴向线的偏角大于 $30^{\circ}$ 时,沙丘迎风坡的NE侧成为迎风前坡,沙子受吹扬产生强烈吹蚀作用;沙丘SW侧成为迎风后坡,不断堆积从迎风前坡搬运来的沙粒,落沙坡侧向搬运现象和沙丘表面侵蚀堆积格局改变,沙丘自身出现逆时针旋转。测区NNW-E向有效起沙风的年均输沙势总和约为189VU,占全年80%以上,5—9月和4—9月的年均合成输沙势分别约占全年的80%和92%(图10)。因此,第1、2和第3、4监测期间有效起沙风频率较高且风速较大,输沙能力较强,风沙活动频繁,沙丘沿自NE指向SW且凸向NW的轨迹曲线快速前移。

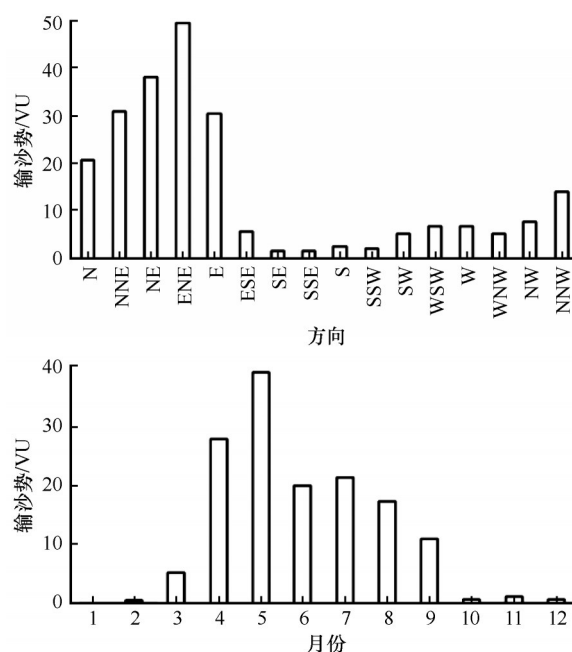


图10 2015—2016年塔中地区各方向年均输沙势和合成输沙势的年内变化<sup>[24]</sup>

Fig.10 Annual variance of resultant sand-transporting potential and annual average drift potential in different directions in central tarim basin, 2015-2016<sup>[24]</sup>

第2、3监测期间为11月至翌年2月,测区以ENE、NE和E向的有效起沙风为主。当E和ENE向有效起沙风与沙丘轴向线的偏角大于 $30^{\circ}$ 时,沙丘迎风坡的SE侧成为迎风前坡,沙粒受吹扬产生强烈的吹蚀作用;沙丘NW侧成为迎风后坡,不断堆积从迎风前坡搬运来的沙粒,使沙丘自身出现顺时针旋转。但由于ENE、NE和E向的冬季有效起沙风频率

较小且合成输沙势占全年的比例不足1%(图10),使沙丘在第2、3监测期间移动速度缓慢,仅沿自NE指向SW且凸向SE或SW向的轨迹曲线缓慢前移。

## 4 讨论

新月形沙丘为流动性沙丘,随起沙风而移动。沙丘的移动方向可指示地表沙物质的输移方向,利用移动速度可估算沙物质的输移量,两者均为防风固沙工程的重要参考指标,且两者与沙丘移动轨迹密切相关。前人开展的大量观测研究,均默认沙丘沿直线轨迹前移,通过量取同一沙丘不同测量时期位置间的直线距离作为移动距离,缺乏对沙丘实际移动轨迹的拟合研究<sup>[4-5]</sup>。沙丘移动轨迹不同,移动距离、移动方向和移动速度亦不相同。

以沙丘移动直线轨迹为基础,已有研究表明,新月形沙丘的移动速度与沙丘高度成反比,而与风沙流输沙量成正比。用数理统计方法亦求得沙丘移动速度与沙丘高度间存有相关系数为0.8的负线性相关性,函数式为 $y=14.03-0.64h$ ( $y$ 为移动速度( $m \cdot a^{-1}$ ), $h$ 为沙丘高度( $m$ ))。但按照前人研究所得的函数关系进行计算时,沙丘移动速度的计算值与实测值有较大差异<sup>[4,6]</sup>,表明沙丘移动轨迹还需做进一步深入研究,且已有的移动速度计算公式也需进一步改进和完善。此外,已有研究表明,沙丘的移动方向为不同测量期沙丘前后位置对应点直线连线的方向且指向合成风向的下风向,不同点在直线移动轨迹上不同位置的移动方向相同<sup>[32]</sup>。而本研究结果表明,新月形沙丘前移动的同时自身出现逆时针或顺时针旋转,其移动轨迹为曲线而非直线,故沙丘某点的移动方向应为该点在轨迹曲线上的切线方向且指向合成风向的下风向,同一点在轨迹曲线不同位置的移动方向不同。

本项研究尝试了一种新月形沙丘三维数字模型建立和移动轨迹拟合的方法,其合理和科学性还有待进一步验证。但测区三维数字模型的建立,可为单期和多期流动性沙丘测量数据进行三维数字建模和移动轨迹拟合提供更好的技术支持,也为增强流动性沙丘显示的实时性奠定基础。本项研究中的等高距设置、TIN建立、栅格单元大小设置及其他相关参数的设置,选择三维可视化应用程序 Arc-Scene 10 进行三维数字建模,只适用于小范围高精度地形模拟,大范围区域的三维数字建模和移动轨

迹拟合方法、参数设置以及建模和轨迹拟合软件选择等问题,还有待做进一步探索。

## 5 结论

本项研究以在新月形沙丘演变监测区测量的高精度三维坐标数据为一手研究数据,应用CASS 9.0和ArcGIS 10.0建立沙丘的三维数字模型并对相邻监测期的三维数字模型进行叠加,并利用AutoCAD 2010中起点、端点和夹角三要素拟合曲线的方法,对沙丘对应特征点的移动轨迹曲线进行了拟合。拟合结果表明,第1、2和第3、4监测期间,典型沙丘表面对应特征点移动轨迹曲线自NE指向SW且凸向NW,且呈平行状态,长度较大,移动速度较快。此外,沙丘对应特征点前移的同时发生逆时针旋转,旋转角度为 $33^{\circ} \sim 38^{\circ}$ 或 $25.5^{\circ} \sim 30^{\circ}$ 。第2、3监测期间,沙丘表面对应特征点移动轨迹曲线较为凌乱,凸向SE或SW,方向不一,长度较小。期间,沙丘对应特征点前移的同时发生顺时针旋转,旋转角度为 $31^{\circ} \sim 37^{\circ}$ 。

第1、2和第3、4监测期间,为风沙活动频繁的春、秋季和夏季,有效起沙风以输沙能力较强的NNW-E向风为主,沙丘自NE向SW快速前移。而第2、3监测期间,ENE、NE和E向有效起沙风风频较小,输沙能力较弱,沙丘移动缓慢。第1、2和第3、4监测期间,NNE、N和NNW向有效起沙风与沙丘轴向线的偏角大于 $30^{\circ}$ ,沙丘迎风坡的NE侧成为迎风前坡,沙丘SW侧成为迎风后坡;第2、3监测期间,E和ENE向有效起沙风与沙丘轴向线的偏角大于 $30^{\circ}$ ,沙丘迎风坡的SE侧成为迎风前坡,沙丘NW侧成为迎风后坡。沙丘迎风前坡不断受吹扬产生强烈吹蚀作用,而迎风后坡不断堆积从迎风前坡搬运来的沙子,落沙坡侧向搬运现象和沙丘表面侵蚀堆积格局改变,使沙丘发生逆时针或顺时针旋转。

沙丘自身旋转角度的出现,表明沙丘移动轨迹应为曲线而非直线。如沙丘移动轨迹为直线,沙丘的前移应是在直线运动轨迹上的位置改变,自身不会发生旋转,本项研究移动轨迹的曲线拟合结果与沙丘实际移动轨迹更为吻合。

## 参考文献:

- [1] 李志忠. 新月形沙丘研究进展综述[J]. 干旱区地理, 1994, 17(4): 81-87.
- [2] Bourke M C. Barchan dune asymmetry: observations from Mars and Earth [J]. Icarus, 2010, 205: 183-197.

- [3] Dong Z B, Wang X M, Chen G T. Monitoring sand dune advance in the Taklimakan Desert [J]. *Geomorphology*, 2000, 35: 219–231.
- [4] 吴正. 风沙地貌学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 10–27.
- [5] 杨岩岩, 刘连友, 屈志强, 等. 新月形沙丘研究进展[J]. *地理科学*, 2014, 34(1): 76–83.
- [6] 朱震达, 陈治平, 吴正, 等. 塔克拉玛干风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1981: 56–80.
- [7] 韩致文, 董治宝, 王涛, 等. 塔克拉玛干沙漠风沙运动若干特征观测研究[J]. *中国沙漠*, 2003, 33(3): 255–263.
- [8] Kocurek G, Ewing R C. Aeolian dune field self-organization-implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns[J]. *Geomorphology*, 2005, 72: 94–105.
- [9] Hersen P. On the crescentic shape of barchan dunes[J]. *European Physical Journal B*, 2004, 37: 507–514.
- [10] 钱广强, 杨转玲, 董治宝, 等. 基于多旋翼无人机倾斜摄影测量的沙丘三维形态研究[J]. *中国沙漠*, 2019, 39(1): 18–25.
- [11] 白子怡, 董治宝, 南维鸽, 等. 植被盖度对风沙流结构及输沙率的影响[J]. *中国沙漠*, 2024, 44(2): 1–10.
- [12] 董玉祥, 黄德全. 海岸新月形沙丘移动与形态变化的典型研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(7): 863–869.
- [13] 韩致文, 杜鹤强, 缙倩倩, 等. 新月形沙丘表面 100 cm 高度内风沙流输沙量垂直分布函数分段拟合[J]. *地理科学*, 2012, 32(7): 892–897.
- [14] 王嵩松. 浑善达克沙地新月形沙丘移动规律与形态演化[D]. 太原: 太原师范学院, 2023.
- [15] 杨郭程, 毛东雷, 王敏仲, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地夏季稳定边界层高度计算与分析[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 64–75.
- [16] Yang N, Su L L, Wan L, et al. A method for building 3D models of barchan dunes[J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 181–188.
- [17] Elbelrhiti H. Initiation and early development of barchan dunes: a case study of the Moroccan Atlantic Sahara desert[J]. *Geomorphology*, 2012, 138(1): 181–188.
- [18] Sauermann G, Andrade J S, Maia L P, et al. Wind velocity and sand transport on a barchan dune[J]. *Geomorphology*, 2003, 54: 245–255.
- [19] 张云枫, 马义娟, 苏志珠, 等. 巴丹吉林沙漠与腾格里沙漠连接带沙丘移动规律[J]. *中国沙漠*, 2022, 42(5): 82–91.
- [20] Bi H X, Li X Y, Guo M X, et al. Digital terrain analysis based on DEM[J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2006, 1(1): 54–58.
- [21] 常直杨, 孙伟红, 王建, 等. 数字高程模型在构造地貌形态分析中的应用现状及展望[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2015, 38(4): 129–136.
- [22] Qi R, Qi M, Li K, et al. The research on the method of 3D terrain generation based on the digital terrain map[J]. *Electronic Design Engineering*, 2014, 22(7): 191–193.
- [23] 龚乐群, 张文山, 刘丹. CASS 软件在工程测量中的使用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2006, 29(4): 115–117.
- [24] 周成龙, 杨兴华, 刘厚勇, 等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区的风动力环境[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(3): 218–222.
- [25] 李爱敏, 韩致文, 钟帅, 等. 基于 CASS 和 ArcGIS 的新月形沙丘属性参数提取[J]. *中国沙漠*, 2018, 38(3): 484–491.
- [26] 李亚云, 成巍, 王宁, 等. 塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠春季沙尘暴特征及其气象影响因素对比[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 1–9.
- [27] Wang C, Li H, Yang J S, et al. Study on generation technique of high quality contour lines based on grid DEM[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 17(2): 160–165.
- [28] Han Z Z, Han R D, Mao S J, et al. Research and application on integration modeling of 3D bodies coal mine with blended data model based on TIN and ARTP[J]. *Journal of Coal Science and Engineering*, 2007, 13(3): 276–280.
- [29] 汤国安, 杨昕. ArcGIS 地理信息系统空间分析实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 92–117.
- [30] Li Y, Yang L H. Based on Delaunay triangulation DEM of terrain model[J]. *Computer and Information Science*, 2009, 2(2): 137.
- [31] Chen Y H, Tong X. Modeling screening efficiency with vibrational parameters based on DEM 3D simulation[J]. *Mining Science and Technology*, 2010, 20(4): 615–620.
- [32] 罗霖炎, 高鑫, 赵永成. 新月形沙丘表面流场特征[J]. *中国沙漠*, 2023, 43(4): 41–54.
- [33] Lei T, Rong Y M, Xu J J, et al. Experiment study and regression analysis of molten pool in laser welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 108: 534–541.
- [34] 冯岩松. SPSS22.0 统计分析应用教程[M]. 北京: 清华大学出版, 2015: 75–90.
- [35] Ramadan S, Hamdan M A, Abu K A M, et al. The provenance and history of Abu Muharak barchan sands (Kharga Depression) inferred from textural, mineralogical, and geochemical perspectives [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 15(19): 3–17.

## The moving trajectory fitting based on three-dimensional digital model of barchan dunes

Li Aimin<sup>1a</sup>, Zhao Peichen<sup>1b</sup>, Han Zhiwen<sup>2</sup>

(1. a.College of Urban Construction /b.School of Mathematics and Statistics, Heze University, Heze 274015, Shandong, China; 2.Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

**Abstract:** In the hinterlands of the Taklimakan Desert, we monitored barchan dune evolution with the Huace X90 GNSS in RTK working mode to obtain 3D coordinates of a dune with millimeter precision. Using these coordinates, a 3D digital model of the dune was built and the 3D digital models of adjacent monitoring periods were superimposed with CASS 9.0 and ArcGIS 10.0. AutoCAD 2010 was used to draw an arc with the three elements of starting point, end point and included angle and to fit the corresponding characteristic point trajectory curve of the eight selected typical dunes. Results of the fitting showed that the dunes rotated counterclockwise with ranges of  $33^{\circ}$ – $38^{\circ}$  and  $25.5^{\circ}$ – $30^{\circ}$  in the monitoring intervals between stages one and two and stages three and four, respectively. The moving trajectories were curves pointing from NE to SW and convex to NW, with long lengths. Between stages two and three, the dunes rotated clockwise with a range of  $31^{\circ}$ – $37^{\circ}$ , and the trajectories was curves pointing from NE to SW and convex to SE or SW, with varying direction and a short length. When the northward or southward angle between effective sand-driving wind and the axial direction was larger than  $30^{\circ}$ , the dune rotated clockwise or counterclockwise, respectively. This indicates that the moving trajectory should be a curve rather than a straight line, which would result in a better fit with the actual movement of the dune. Accurately fitting the moving trajectory of barchan dunes can assist in learning how to fit the movement of other mobile dunes as well as how to correct raw dune evolution data, such as moving distance and speed. It can also lay a foundation for the improvement of a formula for moving speed, which is important because many fields of research concern the moving speed and direction of mobile dunes.

**Key words:** Taklimakan Desert; barchan dune; 3D digital model; fitting moving trajectory