

潘凯佳,张正偲,梁爱民.反向沙丘近地层气流变化及其对沙丘形态的影响[J].中国沙漠,2021,41(2):1-8.

反向沙丘近地层气流变化及其 对沙丘形态的影响

潘凯佳^{1,2}, 张正偲¹, 梁爱民^{1,2}

(1.中国科学院西北生态环境资源研究院,甘肃 兰州 730000; 2.中国科学院大学,北京 100049)

摘要: 反向沙丘形态-动力学过程是风沙地貌的重要研究内容。选择腾格里沙漠东南缘推平沙地发育的反向沙丘为研究对象,采用二维超声风速仪对沙丘表面5个位置0.25 m和0.5 m高度的气流进行野外观测。结果表明:(1)气流方向影响近地层气流特征。以沙丘脊线垂线为轴,0.25 m高度处沙丘脊线的垂线两侧风向变化不完全对称。当丘顶气流方向与脊线垂线角度差值为负时,迎风坡底部风速恢复较慢。(2)背风坡气流特征受风向控制。背风坡0.25 m与0.5 m高度气流变化规律相似,在背风坡中部发生偏转,但沙丘顶部气流方向与脊线垂线相差 $<10^{\circ}$ 时发生反向偏转。丘顶风向为 285° — 315° (左偏)时,0.25 m高度的偏转角度大于0.5 m高度的偏转角度。背风坡0.25 m与0.5 m高度处风速表现为脊线垂线两侧风速变化不一致。(3)沙丘表面气流影响沙丘形态。观测期间沙丘脊线发生明显移动,移动值为0.33 m。背风坡发生堆积,最大堆积厚度为0.44 m,迎风坡发生风蚀,最大风蚀深度为0.43 m。该研究结果证实了风在风沙地貌演化中的重要作用,为反向沙丘形态演化数值模拟提供数据支持。

关键词: 反向沙丘; 超声风速仪; 风速; 风向; 形态

文章编号: 1000-694X(2021)02-001-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00112

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

沙丘形态-动力学过程是风沙地貌的主要研究内容。沙丘形态演化过程受区域风况和近地层气流的双重影响,通过沙丘形态-动力学过程研究,进而预测沙丘移动方向与速率,可为风沙灾害防治提供依据。目前众多学者对沙丘形态特征-动力学过程进行了大量的研究,在沙丘形态与区域风况及其与近地层气流互馈机制等方面取得了丰硕的成果^[1-10]。对单个沙丘或具有明显丘间地的连续沙丘研究表明,沙丘形态特征决定近地层气流的特征,并在背风坡和丘间地形成“二次流”,而“二次流”的结构受沙丘高度和间距的影响^[11-14]。同时,“二次流”又影响沙丘空间分布以及控制沙丘移动特征^[15]。尽管不同学者通过野外观测、风洞模拟和数值模拟等手段对沙丘近地层风速进行了大量研

究^[2-9,15-16],但野外气流的复杂性与测量手段的限制,增加了野外实验的难度。由于沙漠内部沙丘主要是连续分布且丘间地不明显,地形对近地层气流方向影响显著^[4],但目前对这类沙丘形态-动力学过程野外观测较少。

反向沙丘是由于与主风向相反方向风的存在、某一时期内脊线发生偏移而形成的沙丘形态,是McKee^[17]定义的第九种沙丘,也是广泛分布的风沙地貌类型。反向沙丘存在于任何具有相反风向的地区^[1-2],形态与主风向和次风向的变化密切相关,沙丘形态对表面气流的变化敏感。野外调查和观测发现,反向沙丘可由横向沙丘、新月形沙丘和星状沙丘演化而成^[3],形态演化过程包括5个阶段:横向沙丘—反向沙丘—过渡态—反向沙丘—横向沙丘^[2]。但目前对反向沙丘的形态-动力学过程研究相对较

收稿日期:2020-07-06; 改回日期:2020-10-12

资助项目:国家自然科学基金项目(41771011,41930640);西藏自治区“十三五”重点规划项目“雅江北岸易地扶贫搬迁区沙尘监测与预警系统建设”

作者简介:潘凯佳(1998—),女,山西大同人,硕士研究生,主要从事风沙地貌研究。E-mail: pankaijia18@mailsucas.ac.cn

通信作者:张正偲(E-mail: zhangzhisi@sina.com)

少。Lancaster等^[18]对美国内华达州的反向沙丘粒度特征进行分析。张正偲等^[2]对腾格里沙漠东南缘的反向沙丘形态进行观测。Jackson等^[19]对南非东伦敦港口附近反向沙丘近地层气流进行数值模拟研究。以往研究常将反向沙丘与横向沙丘联系在一起^[20-23],或认为是格状沙丘的主梁^[6]。

腾格里沙漠东南缘发育了典型的反向沙丘。本文选择该地区平坦沙地发育的连续分布反向沙丘为研究对象,对沙丘表面0.25 m与0.5 m高度气流进行野外观测,阐明风向对反向沙丘形态-动力学过程的影响。这些观测和研究补充了风沙地貌形态-动力学过程的研究内容,为风沙地貌发育过程的数值模拟提供了理论和实践支持。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘的风沙观测场

(37°33'N、105°01'E,图1A),沙丘类型包括格状沙丘、横向沙丘和新月形沙丘链等。年平均气温为11.21°—12.65°,年平均湿度为36.51%—45.50%,年降水量为71.44—116.60 mm,属温带大陆性气候,也属半干旱与干旱的交界处。夏季以东南风为主,冬季以西北风为主,西北风风季长,东南风风季短。输沙势以西北风为主(70%),其次为东南风(19%)和东北风(9%)^[2],属于低等强度风沙环境。沙丘表面平均粒径为0.19—0.23 mm,沙丘主体(迎风坡、丘顶和背风坡)基本无植被生长,仅丘间地有零星沙蒿分布(图1B)。

1.2 野外观测方法

本研究主要是对背风坡气流场进行野外观测。所选沙丘高度为2.5 m,背风坡底部为15°,背风坡中部以上为25°,与相邻沙丘无明显丘间地,仅有约1 m左右的平缓过渡区(图2A)。风速、风向数据利用二维超声风速仪(Gill公司,英国)测量,并利用数

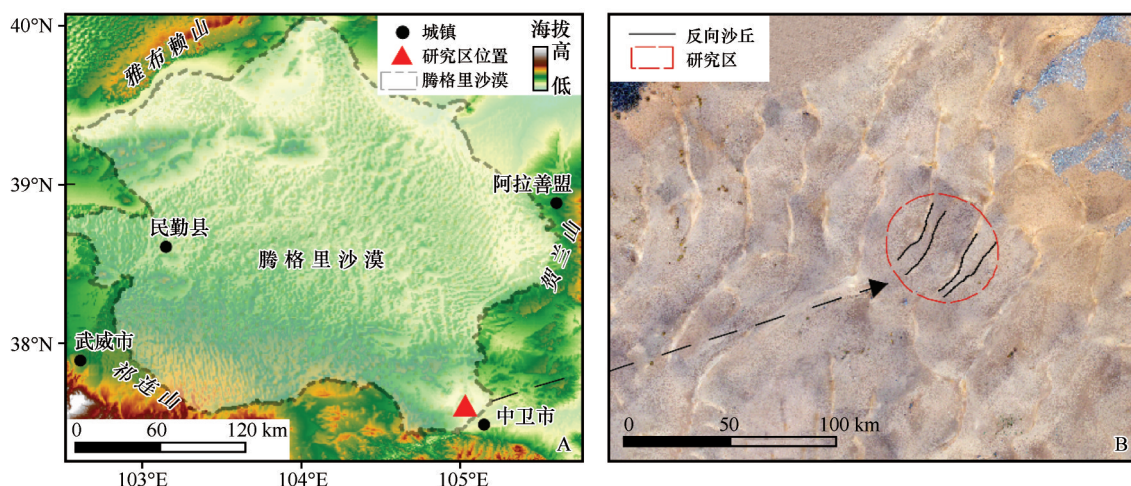


图1 研究区地理位置(A)与反向沙丘(B)

Fig.1 Location (A) and reversing dunes (B) of the study region

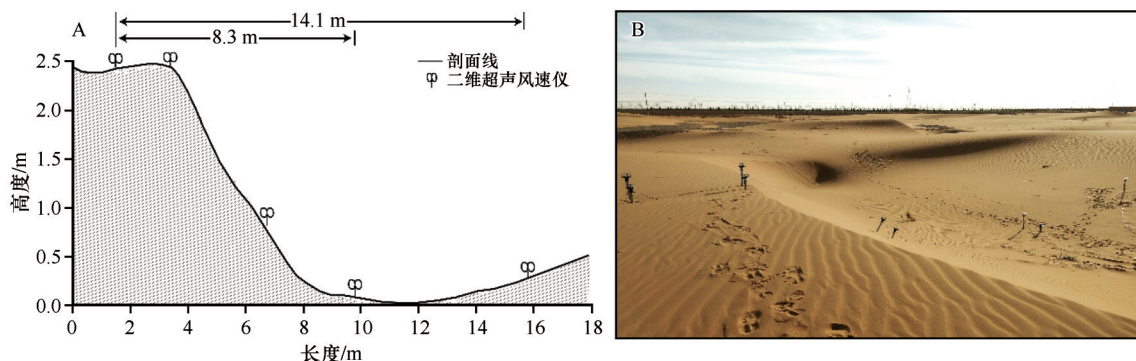


图2 沙丘形态与超声风速仪安装位置示意图(A)与野外观测照片(B)

Fig.2 Dune geomorphology and sonic anemometer set up sites (A) and the photo of field experiment (B)

据采集仪 CR6 (Campbell 公司, 美国) 收集, 数据采集频率为 1 Hz, 记录和保存时间为 1 min。二维超声风速仪安装在沙丘顶部 (丘顶)、脊线、背风坡中部 (背中)、背风坡底部 (背底) 和迎风坡底部 (迎底) 5 个位置, 且每个位置处安装 2 个超声风速仪, 安装高度分别为距沙丘表面 0.25 m 和 0.5 m (图 2B)。观测期间保持仪器与沙丘表面平行。

1.3 数据处理方法

野外观测自 2019 年 3 月 27 日 00:00 至 2019 年 3 月 30 日 12:00, 但由于 3 月 27—28 日和 3 月 30 日观测时间段内风速较小 (图 3A), 所以选择 2019 年 3 月 29 日 08:00—20:00 共 720 条数据。以丘顶为例, 观测期间, 沙丘气流风向集中在 285° — 355° (图 3B)。风速的变化范围为 1.03 — $13.48 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且 12:00—16:00 风速较大; 风速脉动在 10:00—18:00 较为明显, 尤其是在 12:00—16:00 最为明显。

野外观测风速风向脉动比较明显。为了阐明背风坡气流的变化特征, 按照以下步骤进行数据处理与统计分析: (1) 数据预处理: 把数据分为两个高度 0.25 m 和 0.5 m; 并针对不同高度的数据, 对所测数据按风向进行排序, 并以 10° 为间隔将风向划分为 7 个序列 (285° — 294° , \dots , 346° — 355°)。由于入射气流方向与脊线垂直时变化较为复杂, 故单独将该风向划分为一组 (315°), 共计 8 组风向数据。(2) 风速划分。在划分好的风向序列内, 按照风速值 $<6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 6 — $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 8 — $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 、 $>10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 进行划分。(3) 对划分好的数据进行统计分析。统计指标包括: ① 风速比值。采用其他位置的风速与丘顶风速的比值 ($k=u/u_{\text{顶}}$, $u_{\text{顶}}$ 为丘顶风速, u_i 为其他位置风速) 说明沙丘不同部位的风速差异特征。② 平均风速。为排除脉动值的影响, 风速取平均值来表示

其变化, 以阐明背风坡近地层气流风速与风向变化特征。③ 加权平均风速。对风向和风速做加权计算。统计不同风速段内的频数, 求得不同风速段内频数在每个风向序列的占比, 进而得到不同高度 (0.25 m 与 0.5 m) 不同地貌部位气流风速和风向变化。

所有数据分析及绘图在 OriginPro6 和 Adobe Illustrator CS5 中完成。为了便于分析, 规定丘顶风向与沙丘脊线垂线角度差值为负 (逆时针方向) 时记为左偏, 否则则为右偏。本文所分析的气流方向均相对于沙丘顶部。

沙丘形态利用大疆无人机搭载红鹏相机所拍摄的无人机照片经后期处理得到, 并在 ArcGIS10.2 中利用 3D 分析工具中的剖面工具得实测剖面数据, 具体参数见 [24]。

2 结果与分析

2.1 近地层风速与风向变化特征

沙丘表面风向与风速变化不仅与沙丘顶部入射风速有关, 也与沙丘顶部入射风向有关。所以, 我们以距地面 0.25 m 处观测数据为例, 说明并分析背风坡气流变化。

丘顶风向分布在相同范围内时, 不同的丘顶入射速度对应的背风坡风速变化规律趋同, 均表现为背风坡风速减小, 但迎风坡风速增加 (表 1)。随丘顶风向变化 (从左偏到右偏的过程中), 背风坡风速比值 k 差别较大, 且与丘顶风向和脊线垂线夹角有关 (表 1)。除丘顶风向为 326° — 355° , 丘顶风向与脊线垂线夹角越小, 脊线风速比值 k 越大, 背风坡中部风速比值 k 也越大, 即风速越大。此外, 丘顶风向为 285° — 314° 的风速比值 k 小于 316° — 355° 的风速比

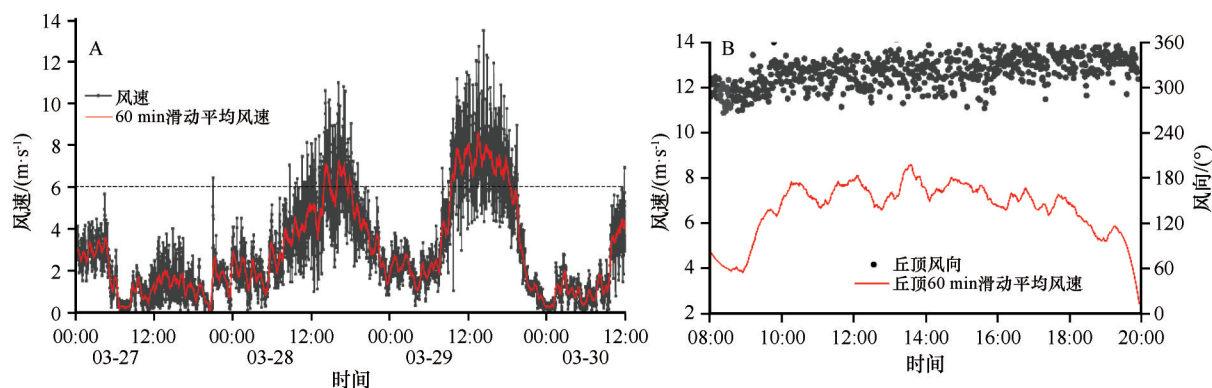


图3 观测期间风速变化(A)与沙丘顶部风速与风向变化(B)

Fig.3 The variation of wind speed (A) and wind speed and direction at dune crest (B) during field observation process

表 1 不同位置风速比值 k /风向($^{\circ}$)
Table 1 Percentage of wind speed ratio (k) and wind direction ($^{\circ}$)

风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	位置				风速 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	位置			
	脊线	背风坡中部	背风坡底部	迎风坡底部		脊线	背风坡中部	背风坡底部	迎风坡底部
丘顶风向 $285^{\circ}\text{--}294^{\circ}$					丘顶风向 $295^{\circ}\text{--}304^{\circ}$				
$<6(N=32)$	0.63/296	0.38/189	0.4/259	0.48/263	$<6(N=32)$	0.55/237	0.34/174	0.34/219	0.46/269
$6\text{--}8(N=17)$	0.91/283	0.28/166	0.24/180	0.34/251	$6\text{--}8(N=24)$	0.91/291	0.26/123	0.3/115	0.36/299
$8\text{--}10(N=11)$	0.88/284	0.23/158	0.26/191	0.42/287	$8\text{--}10(N=8)$	0.91/282	0.2/154	0.24/186	0.24/271
$<10(N=2)$	0.95/286	1101	0.27/166	0.24/344	$>10(N=3)$	0.88/288	0.15/182	0.24/191	0.27/227
丘顶风向 $305^{\circ}\text{--}314^{\circ}$					丘顶风向 315°				
$<6(N=38)$	0.76/282	0.41/139	0.38/170	0.42/265	$<6(N=3)$	1.01/306	0.25/119	0.42/90	0.47/323
$6\text{--}8(N=41)$	0.89/304	0.3/128	0.31/127	0.41/276	$6\text{--}8(N=3)$	0.91/304	0.3/95	0.47/63	0.57/331
$8\text{--}10(N=15)$	0.88/306	0.29/99	0.29/151	0.47/351	$8\text{--}10(N=2)$	0.99/317	0.32/78	0.55/59	0.67/354
$>10(N=3)$	0.81/302	0.27/76	0.17/205	0.22/364	$>10(N=0)$	—	—	—	—
丘顶风向 $316^{\circ}\text{--}325^{\circ}$					丘顶风向 $326^{\circ}\text{--}335^{\circ}$				
$<6(N=45)$	0.92/310	0.4/121	0.45/123	0.67/356	$<6(N=34)$	1/325	0.46/80	0.53/17	0.65/1
$6\text{--}8(N=63)$	0.89/316	0.37/104	0.34/105	0.49/360	$6\text{--}8(N=61)$	0.91/323	0.38/96	0.39/76	0.56/3
$8\text{--}10(N=29)$	0.86/313	0.36/114	0.34/98	0.49/353	$8\text{--}10(N=27)$	0.91/321	0.42/96	0.36/72	0.46/357
$>10(N=7)$	0.86/313	0.34/90	0.34/25	0.45/332	$>10(N=7)$	0.86/324	0.31/74	0.43/79	0.48/352
丘顶风向 $336^{\circ}\text{--}345^{\circ}$					丘顶风向 $346^{\circ}\text{--}355^{\circ}$				
$<6(N=45)$	0.98/330	0.52/77	0.55/19	0.78/359	$<6(N=14)$	1/345	0.45/74	0.62/43	0.8/355
$6\text{--}8(N=41)$	0.99/335	0.54/81	0.5/52	0.68/355	$6\text{--}8(N=32)$	1/334	0.48/74	0.59/46	0.75/1
$8\text{--}10(N=23)$	0.96/335	0.47/84	0.5/53	0.64/355	$8\text{--}10(N=12)$	0.95/344	0.45/77	0.51/51	0.62/360
$>10(N=3)$	1.01/337	0.4/93	0.39/80	0.31/360	$>10(N=5)$	0.96/344	0.46/79	0.54/65	0.64/357

值 k , 这应该与丘顶风向有关^[4], 并影响背风坡气流的分流。背风坡风向的变化规律也与丘顶风向相关, 且在背风坡中部偏转角度达到最大。即丘顶风向与脊线垂线夹角越小, 风向在背风坡的偏转角度越大。丘顶风向与脊线垂线相差 10° 时, 背风坡中部风向与丘顶风向几乎完全相反。但丘顶风向左偏时背风坡风向偏转角度大于右偏时偏转角度(表 1)。即丘顶风向与脊线垂线夹角为 $10^{\circ}\text{--}40^{\circ}$ 的范围内, 丘顶风向为 $285^{\circ}\text{--}304^{\circ}$ (左偏) 与丘顶风向为 $325^{\circ}\text{--}355^{\circ}$ (右偏) 的背风坡中部偏转角度相差 $17^{\circ}\text{--}51^{\circ}$ 。而丘顶风向与脊线垂线角度相差 $0^{\circ}\text{--}10^{\circ}$ 时, 丘顶风向为 $305^{\circ}\text{--}314^{\circ}$ (左偏) 与丘顶风向为 $316^{\circ}\text{--}325^{\circ}$ (右偏) 的背风坡中部偏转角度相差 $5\text{--}11^{\circ}$ 。这说明丘顶入射风向不同, 背风坡气流的变化特征不同。

迎风坡底部的风速比值 k 则表现为两种不同的变化规律。左偏时, 随着丘顶风向增大, 风速比值 k

值在 $0.22\text{--}0.48$ 范围内波动; 右偏时, 迎风坡底部风速比值 k 随着丘顶风向增大而变大(由 0.53 增加至 0.70)。这说明丘顶风向影响背风坡风速的恢复过程。此外, 迎风坡风向具有与背风坡不同的变化规律: 随着丘顶风向由与脊线斜向变为垂直再变为斜向的过程中(即风向由 285° 增加到 355°), 迎风坡底部风向更容易恢复到与丘顶风向相近的范围(表 1)。即随着丘顶风向变化, 迎风坡底部风向与丘顶风向的偏转角度减小。当丘顶风向为 $285^{\circ}\text{--}304^{\circ}$ 时, 迎风坡底部风向恢复至与丘顶风向相差 $<72^{\circ}$ 。而当丘顶风向为 $326^{\circ}\text{--}355^{\circ}$ 时, 迎风坡底部风向恢复至与丘顶风向相差 $<33^{\circ}$ 。

总之, 丘顶风向与风速不同, 背风坡风速与风向变化不同, 表现为风向与风速在脊线垂线两侧不完全对称(表 1)。同一沙丘在丘顶风向相同时, 不同的丘顶入射风速对应着背风坡风速与风向变化规律基本相同。而丘顶风向与脊线垂线夹角不同

时,夹角越小,背风坡风向偏转角度越大;随着丘顶风向的偏转(风向由 285°偏转到 355°),风速比值 k 越大。

2.2 近地层不同高度风速与风向差异特征

总的来说,0.25 m 与 0.5 m 高度处背风坡的所有位置风向变化规律相似(图 4),且两个高度处风向

差值均小于 40°(表 2)。但背风坡气流在 0.25 m 与 0.5 m 高度偏转角度不同,丘顶风向为 285°—315°(左偏)时,0.25 m 处的偏转角度大于 0.5 m 处的偏转角度,而丘顶风向为 316°—355°(右偏)时完全相反(表 3)。这说明背风坡气流在近地层(<0.5 m)风向没有发生较大变化,但不同高度处风向偏转规律不同,这主要受丘顶风向入射角和地形影响。

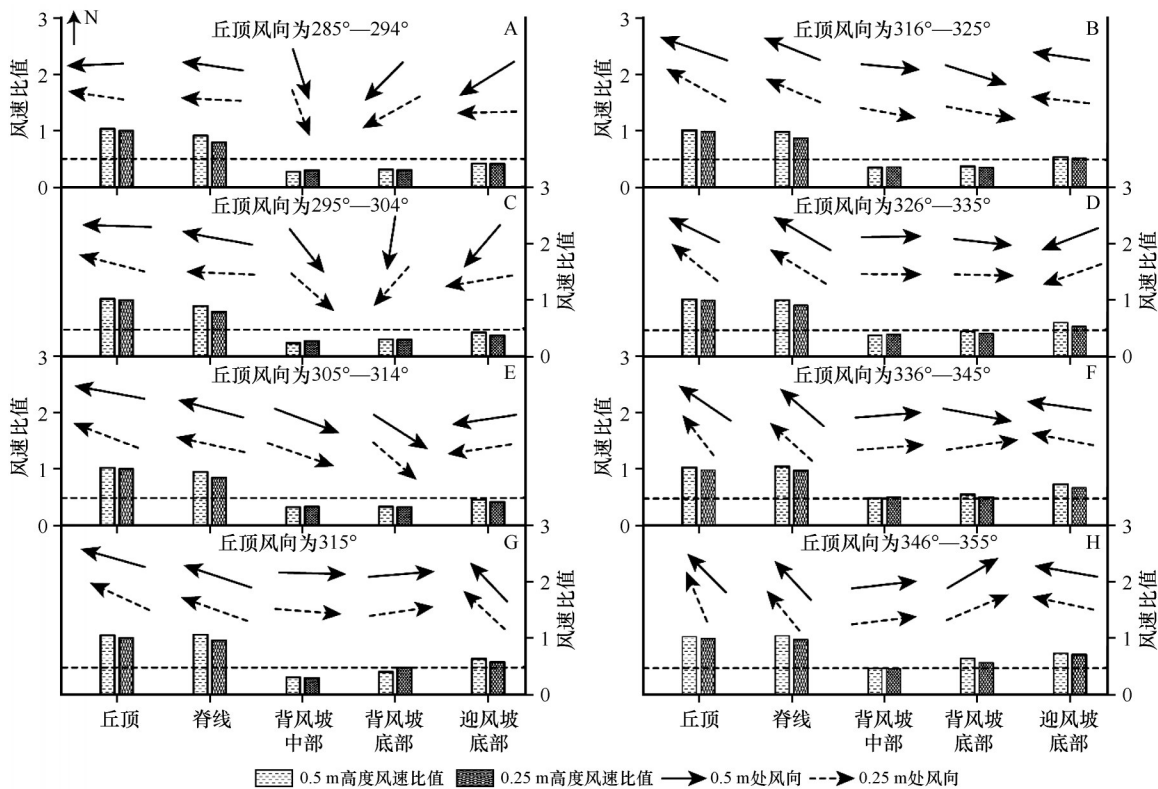


图 4 不同丘顶风向时沙丘迎风坡、脊线和背风坡 0.25 m 和 0.5 m 高度风向和风速差异
Fig.4 The difference of wind direction and speed at 0.25 m and 0.5 m height for the toe, crest, and leeward of dune with different incidence angle at toe

表 2 沙丘迎风坡、脊线和背风坡 0.25 m 和 0.5 m 高度风向(°)差值				
Table 2 The difference of wind direction at 0.25 m and 0.5 m for dune toe, crest, and leeward				
丘顶风向	脊线	背风坡中部	背风坡底部	迎风坡底部
285°—294°	-10	-2	15	51
295°—304°	-18	-8	18	48
305°—314°	-5	-2	8	0
315°	2	7	-8	-3
316°—325°	2	10	-13	-4
326°—335°	1	3	-10	3
336°—345°	1	0	-39	6
346°—355°	2	-1	10	4

在迎风坡底部,丘顶风向为 285°—304°时,0.25 m 与 0.5 m 高度风向差值为 48°—51°;而丘顶风向为 305°—355°时,0.25 m 与 0.5 m 高度风向差值为 0°—6°(表 2)。这表明丘顶风向为 285°—304°时,迎风坡底部风向在 0.25 m 与 0.5 m 高度有较大差异。

0.25 m 与 0.5 m 高度风速变化基本一致,存在相同规律(图 4)。背风坡中部风速最小,仅有丘顶的 0.23—0.52。在背风坡底部和迎风坡底部交汇处,风速与风向开始恢复,但没有恢复到与脊线风向一致。此外,丘顶风向右偏时,迎风坡底部风速比值 $k \geq 0.50$,气流方向与主风向差值越大,风速恢复越快;而丘顶风向左偏时,迎风坡底部风速比值 $k \leq 0.50$ 。

表 3 沙丘背风坡气流 0.25 m 和 0.5 m 高度偏转角度(°)
Table 3 Change of leeward deflection angle at 0.25 m and 0.5 m

高度	285°—304°		305°—314°		315°		316°—325°		326°—355°	
	背风坡中部	背风坡底部	背风坡中部	背风坡底部	背风坡中部	背风坡底部	背风坡中部	背风坡底部	背风坡中部	背风坡底部
0.25 m	119—146	70—97	177	157	144	117	151	151	85—120	58—122
0.5 m	92—113	60—90	162	147	151	137	154	177	100—130	61—146

2.3 观测期间沙丘形态变化

近地层气流对沙丘形态演化起着重要作用。观测期间除 3 月 29 日风速较大外,整个观测期间风速较小(图 3),所以可以认为沙丘脊线的移动和形态变化是由西北风造成的(图 5D)。因此,在西北风(盛行风)作用下,沙丘脊线向东南移动 0.33 m;背风

坡表现为风沙物质堆积,堆积最大厚度为 0.44 m;迎风坡发生风蚀,侵蚀最大深度为 0.43 m(图 5A)。野外观测照片也表明沙丘脊线发生移动和沙丘丘顶形态改变(图 5B、C)。所以在盛行风向下,短期内沙丘脊线发生移动,背风坡发生风积,迎风坡发生风蚀,沙丘发生缓慢移动。

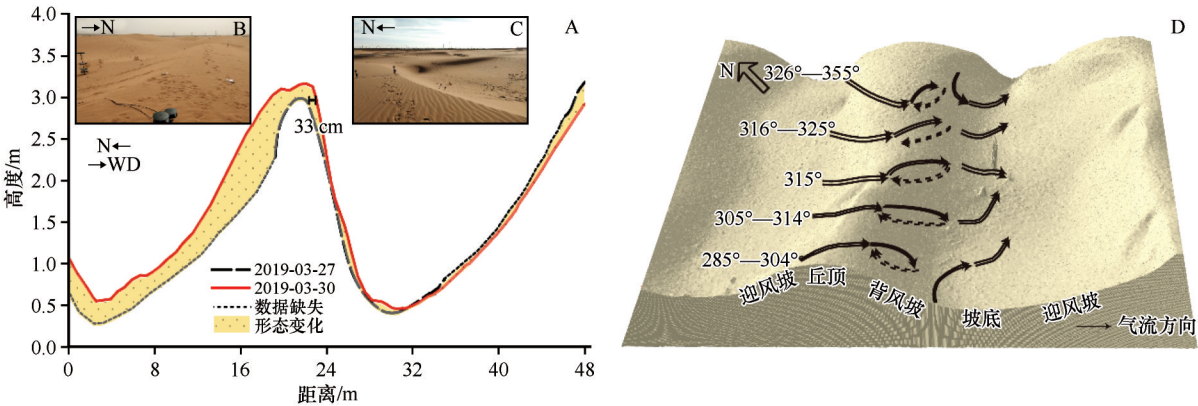


图 5 2019 年 3 月 27 日与 30 日反向沙丘实测剖面图(A)、27 日野外照片(B)、30 日野外照片(C)及背风坡气流变化(D)
Fig.5 A measured section of reversing dune on March 27, 2019 and March 30, 2019 (A), field photos on March 27 (B) and March 30 (C), and the model of leeward airflow (D)

3 讨论

3.1 沙丘形态与风向的关系

风况是影响沙丘形态发育的重要动力因素,风向对沙丘类型的形成具有重要意义,不同的风向形成不同的沙丘类型^[10,17]。宏观上,反向沙丘发育在任何有两种相反风向的地区,如季风交汇区(巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠、毛乌素沙地等)和非季风区(雅鲁藏布江中游、库姆塔格沙漠等)。微观上,背风坡气流变化控制沙丘形态参数的空间格局。有学者认为背风坡气流受入射风向的影响,包括分离流、重附未偏向流、重附偏向流和反向流^[7-8,12-14]。本研究发现,由于反向沙丘形态的特殊性,及其在沙丘地貌形态演变过程中的过渡作用,当丘顶入射气

流与脊线垂直方向角度差相同时,背风坡气流方向变化特征不对称(图 5D)。丘顶风向与脊线垂直方向相差 10°以内,背风坡气流发生反向。当丘顶风向与脊线垂直方向相差 10°—50°时,背风坡气流发生偏转(图 5D)。自背风坡底部开始,风向有恢复的趋势。该研究结果与前人所得结果基本一致^[12-13,19]。丘顶入射风向与脊线垂直方向的夹角为锐角或钝角时,背风坡气流发生偏转或者反向^[12-14]。本研究发现即使丘顶入射风向与脊线垂直方向的夹角相同时,背风坡气流在脊线垂直方向(法线)的变化不对称,即偏转或者反向角度不同。这可能与丘顶入射风向角度不同有关,丘顶风向影响背风坡表面气流湍流属性^[4],进而导致沙丘背风坡气流在脊线垂直方向变化不对称。而且沙丘表面不同高度处气流偏转也不同。通过对沙丘背风测气流的

野外实测,可以为沙丘形态的数值模拟提供依据。

3.2 沙丘形态与风速的关系

风速是沙丘形成与演化的动力因素,其中风速决定沙丘移动速度,影响沙丘表面粒径分布,并对塑造沙丘形态有重要作用。一般来说,沙丘表面风速沿迎风坡增大,沿背风坡减小。数值模拟表明,反向沙丘背风坡风速的变化是初始风速的0.8—1.2倍^[19]。但对于高度小于3 m的连续沙丘,沙丘对近地层气流的影响远比数值模拟的复杂得多(表1)。风速变化与风向有一定的关系,如风向为285°—315°时背风坡风速变化值大于风向为316°—355°时。对于连续分布的沙丘,由于丘间地较小,风速加速和减速的区域比较复杂。背风坡风速是丘顶风速的0.1—0.62,远小于数值模拟结果^[19],这可能与模拟的初始风速偏大及模拟参数有关。脊线和丘顶风速较大从而导致脊线部位容易形成风沙流,并造成沙丘脊线移动(图5A)。Walker等^[12]指出,在一次短期强风暴事件中,沙丘顶部移动可达1.25 m。

4 结论

背风坡气流风向与风速变化均与丘顶风向有关。以沙丘脊线垂线为轴,0.25 m高度处沙丘脊线垂线两侧风向变化不完全对称,当丘顶气流方向与脊线垂线风向差值为负时,迎风坡底部风速恢复较慢。

背风坡气流特征由风向控制,背风坡0.25 m与0.5 m高度气流方向变化规律相似。丘顶风向与脊线垂线方向夹角越小,背风坡中部风向偏转越大。在沙丘入射风向与脊线垂直方向相差<10°时发生反向偏转。但0.25 m与0.5 m高度背风坡气流偏转角度不同,丘顶风向为285°—315°(左偏)时,0.25 m处的偏转角度大于0.5 m处的偏转角度。在沙丘表面不同高度处,脊线垂线两侧风速不一致。

沙丘表面气流影响沙丘形态。观测期间沙丘脊线发生移动,其值为0.33 m。背风坡发生堆积,最大堆积厚度为0.44 m,迎风坡发生风蚀,最大侵蚀深度为0.43 m。

参考文献:

- [1] 张正偲,董治宝.风沙地貌形态动力学研究进展[J].地球科学进展,2014,29(6):734-747.
- [2] 张正偲,董治宝,管梦鸾.腾格里沙漠东南缘反向沙丘形态演化过程[J].中国沙漠,2018,38(4):709-715.
- [3] 张正偲,董治宝.黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌[J].中国沙漠,2014,34(2):332-341.
- [4] 张正偲,董治宝.横向沙丘表面气流湍流特征野外观测[J].地理科学,2015,35(5):652-657.
- [5] 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,2011:245-259.
- [6] 哈斯,董光荣,王贵勇.腾格里沙漠东南缘格状沙丘的形态—动力学研究[D].中国科学:地球科学,1999,29(5):466-471.
- [7] 哈斯,王贵勇,董光荣.沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义[J].沉积学报,2001,19(1):96-100.
- [8] 钱广强,董治宝,罗万银,等.横向沙丘背风侧气流重附风洞模拟[J].中国沙漠,2008,28(1):16-20.
- [9] 张正偲,董治宝,钱广强,等.腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J].中国沙漠,2012,32(6):1528-1533.
- [10] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1941.
- [11] Frank A, Kocurek G. Toward a model for airflow on the lee side of Aeolian dunes [J]. Sedimentology, 1996, 43(3): 451-458.
- [12] Walker I J, Shugar D H. Secondary flow deflection in the lee of transverse dunes with implications for dune morphodynamics and migration [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2013, 38(14): 1642-1654.
- [13] Sweet M L, Kocurek G. An empirical model of aeolian dune lee-face airflow [J]. Sedimentology, 1990, 37(6): 1023-1038.
- [14] Walker I J, Nickling W G. Dynamics of secondary airflow and sediment transport over and in the lee of transverse dunes [J]. Progress in Physical Geography, 2002, 26(1): 47-75.
- [15] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. A wind tunnel simulation of the effects of stoss slope on the lee airflow pattern over a two dimensional transverse dune [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112: F03019.
- [16] Lynch K, Jackson D W T, Cooper J A G. Coastal foredune topography as a control on secondary airflow regimes under offshore winds [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(3): 344-353.
- [17] McKee E D. A Study of Global Sand Seas [M]. Washington, USA: US Government Printing Office, 1979: 12-15.
- [18] Lancaster N, Nickling W G, McKenna N C. Particle size and sorting characteristics of sand in transport on the stoss slope of a small reversing dune [J]. Geomorphology, 2002, 43: 233-242.
- [19] Jackson D W T, Cooper A, Green A, et al. Reversing transverse dunes: modelling of airflow switching using 3D computational fluid dynamics [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2020, 544: 116363.
- [20] 李超,董治宝,崔徐甲.腾格里沙漠东南缘不同发育阶段横向沙丘粒度特征[J].中国沙漠,2015,35(1):129-135.
- [21] Wiggs G F S, Livingstone I, Warren A. The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence from field and wind tunnel measurements [J]. Geomorphology, 1996, 17(1/3): 29-46.
- [22] Van Boxel J H, Sterk G, Arens S M. Sonic anemometers in aeolian sediment transport research [J]. Geomorphology, 2004, 59

- (1/4):131–147.
- [23] Baddock M C, Wiggs G F S, Livingstone I. A field study of mean and turbulent flow characteristics upwind, over and downwind of barchan dunes [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(11): 1435–1448.
- [24] 潘凯佳, 张正偲, 梁爱民, 等. 基于倾斜摄影技术的戈壁灌丛沙丘形态反演及其对粉尘释放研究的意义 [J]. *中国沙漠*, 2020, 40(2): 24–32.

The characteristics of inner boundary layer airflow over reversing dunes and its effect on dune morphological evolution

Pan Kaijia^{1,2}, Zhang Zhengcai¹, Lang Aimin^{1,2}

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The morphology-dynamic processing of reversing dune is an important issue in Aeolian geomorphology, but a little research have been done for these dunes, which limits our understanding of the dunes formation and development. For this reason, a developing reversing dunes in the southeast edge of Tengger Desert was selected. Ten-dimensional ultrasonic anemometer was used and set up at top, crest leeward stoss, dune toe, and windward stoss at 0.25 m and 0.5 m height over dune surface. The results indicated that: (1) The direction of airflow affects characteristics of airflow. Wind directions were not completely symmetry on the left and right sides of an axis perpendicular to the crest at 0.25 m height. When the flow angle between airflow directions and the direction of perpendicular line to the crest are negative, the wind speed at the windward slope recovers slowly. (2) The airflow characteristics of leeward slope are controlled by the wind direction. The variation of airflow at 0.25 m and 0.5 m height are similar, and deflection occurs in the middle of the leeward slope, and reversing deflection occurs within a range of 10° between the airflow direction at the top of the dune and perpendicular to the crest. However, when the wind at the top of the dune is 285°–315°, the deflection at 0.25 m is greater than that 0.5 m. The wind speed of 0.25 m and 0.5 m at the leeward slope is inconsistent on both sides of the direction perpendicular line to the crest. (3) Dune surface airflow affects dune morphology. During the observation period, the crest of dune moved significantly with a movement value of 0.33 m. Sediment accumulation occurred on leeward slope with the maximum thickness of 0.44 m, and erosion occurred on windward slope with the maximum depth of 0.43 m. The results of this study are important to clarify the effect of wind in the evolution of dune morphology and provide data for numerical simulation.

Key words: reversing dunes; sonic anemometer; wind speed; wind direction; morphology