



论文

不同坡度障碍物前气流场特征及其对回涡沙丘形成的影响

钱广强*, 董治宝, 罗万银, 张正偲, 赵爱国

中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000

* Email: gqian@lzb.ac.cn

收稿日期: 2010-12-19; 接受日期: 2011-04-01

国家自然科学基金(批准号: 40801007)和中国科学院“西部之光”博士资助项目资助

摘要 针对布设在腾格里沙漠东南缘的 5 个不同迎风坡坡度的障碍物模型, 采用超声风速仪, 在野外实测了障碍物前的气流速度场. 气流水平和垂直速度的变化规律表明, 障前气流场特征受障碍物迎风坡坡度控制. 当迎风坡坡度小于 60° 时, 障前气流以减速和上升运动为主, 而当迎风坡坡度大于 60° 时, 障前出现了不同程度的反向气流. 水平速度反向区的范围随迎风坡坡度的增大而增大, 而垂直速度反向区的范围则随坡度的增大呈变高变窄趋势. 受障碍物影响, 障前气流表现出可影响沙粒跃移运动的低频高能速度脉动, 气流逼近障碍物时, 水平和垂直速度湍流强度均增大. 距障碍物越近、坡度越大, 湍流强度越强. 障前气流减速和下沉运动导致风沙流局部过饱和从而发生堆积, 这为回涡沙丘的形成提供了物质基础; 气流反向不仅影响回涡沙丘的初始发育位置, 还是塑造沙丘形态的动力因子.

关键词回涡沙丘
平均速度
湍流强度
沙丘动力过程
超声风速仪

沙丘作为一种风积地貌类型, 是运移风沙流因携沙能力降低而发生局地堆积, 并经风力进一步塑造而成的. 在沙丘分类系统中, 根据风沙堆积和形态塑造过程中有无障碍物的影响, 可分为自堆积沙丘以及障碍物沙丘两类^[1,2], 其中前者包括了常见的新月形沙丘及沙丘链、反向沙丘、线形(赛夫)沙丘、金字塔(星状)沙丘等; 而后者则根据障碍物类型的不同, 可划分为植被障碍沙丘(如灌丛沙丘、抛物线沙丘、植被线形沙丘等)和地形障碍沙丘(根据沙丘发育的不同位置, 包括障碍物前的回涡沙丘、障碍物迎风坡的爬坡沙丘、障碍物顶部的崖顶沙丘、背风坡的落坡沙丘以及风影沙丘等). 目前, 关于自堆积沙丘和部分植被障碍沙丘的形成发育机理已有定性结论, 并

在次生流结构对沙丘形成发育过程的影响方面形成共识^[3,4]. 而对于地形障碍沙丘, 由于其在风沙地貌分类体系中不占主要地位, 过去几十年来一直未得到足够的关注. 回涡沙丘是一种重要的地形障碍沙丘, 这种沙丘的形成和发育并不需要充分的沙源供应, 因而多分布在沙漠边缘以及存在过境风沙流的地区; 在具有一定高度和特定迎风坡坡度的障碍物前, 如悬崖、雅丹、密集灌丛、建筑物、防沙栅栏、高路堤等的迎风面等, 均可见到此类风沙堆积形态.

国内外研究者早在 20 世纪 40 年代就注意到这种风沙堆积现象, 如风沙物理学创始人 Bagnold^[5]认为障前的风沙堆积是运移沙粒与障碍物碰撞后反弹降落形成的; 彼特罗夫^[6]提出, 障碍物前的风沙堆积,

不仅缘于沙粒与障碍物的撞击反弹, 还与部分气流遇到障碍物后发生反射并造成气流减速有关. Embleton 等^[7]则认为, 回涡沙丘的形成是由于障碍物前存在一个垂直气流涡旋. Tsoar^[8]通过系统的风洞模拟实验, 提出有利于回涡沙丘发育的临界迎风坡坡度为 55° , 在此条件下, 障前存在一个回旋涡流, 反向气流抵消了运移风沙流的携沙能力, 从而造成风沙堆积并形成回涡沙丘. 李森等^[9,10]在研究雅鲁藏布江河谷风沙地貌发育问题时, 提出在 $\geq 60^\circ$ 的山体前出现了气流回流, 风沙流发生堆积并形成回涡沙丘(亦称反射沙丘). Liu 等^[11]根据风洞实验结果, 进一步提出了回涡和爬坡沙丘发育所需的坡度与来流方向组合条件, 认为利于回涡沙丘形成的临界迎风坡坡度随着障碍物与来流夹角的增大而减小. 目前有关回涡沙丘形成条件和发育机理的论述, 国内外风沙地貌研究领域普遍采用 Tsoar^[8]的理论.

近二十年的风沙地貌研究结果表明, 次生流(也有称二次流者)在沙丘形成发育过程中起着重要作用^[3,4,12]. 对于自堆积沙丘类型, 只有当沙丘发育到一定程度, 沙丘凸入大气边界层成为风沙流运移的障碍时, 次生流才开始发育. 而对于回涡沙丘, 其在形成之初就存在障碍物前的次生流, 当风沙堆积之后这种次生流结构会在沙丘形态的影响下而进一步复杂化. 因此, 传统的次生流作用机理难以解释回涡沙丘的形成. 此外, Tsoar^[8]所提出的回涡沙丘形成发育条件是建立在风洞模拟基础上的, 尚未得到野外观测的证实; 他在风洞实验中采用热线风速仪测速, 但由于测速原理的限制, 并未测得严格意义上的反向气流, 而是辅之以气泡示踪的方法目测判定反向流区域.

由于回涡沙丘形成和发育过程中存在复杂的次生流作用, 因此对障前气流结构的深入认识是揭示该类型沙丘形态动力过程的关键. 测量技术的发展和沙丘动力学理论的进步, 使得采用更为精确的测量设备, 从次生流角度入手探讨回涡沙丘形态-动力过程成为可能. 本文尝试将三维超声风速仪应用于回涡沙丘动力学研究, 通过在野外布设具有不同迎风坡坡度的障碍物模型, 实地观测障前的气流场结构, 定量分析障前气流减速以及反向效应; 基于速度分量及气流湍流参数计算结果, 探讨次生流在回涡沙丘形成和发育过程中的作用.

1 研究方法

1.1 野外观测

野外观测在中国科学院风沙观测场进行, 该观测场位于腾格里沙漠东南缘、宁夏中卫市西北约 13 km 处, 具有面积约 0.5 km^2 的人工推平沙地可用于风沙观测($37^\circ 33' 42'' \text{N}$, $105^\circ 02' 02'' \text{E}$). 选取观测场内的平坦沙地, 布设了 5 个具有不同迎风坡坡度的人工障碍物模型, 模型采用木工板加工而成; 考虑到大部分沙粒的跃移高度在近地表 1 m 以下, 模型的高度设置为 1.2 m, 宽度为 2.8 m, 迎风坡坡度分别为 45° , 50° , 60° , 70° 和 80° , 所有模型均与来流方向垂直摆放.

气流场测量采用三维超声风速仪(WindMaster Pro, Gill Instruments). 由于障碍物前观测空间限制, 同时为了减小测量仪器自身对气流场的干扰, 我们采用四台超声风速仪同步测量, 其中三台连接在 CR1000 数采仪(Campbell Scientific Inc.)上, 测量障碍物前不同位置同一高度处的风速分量. 测点布置如图 1 所示, 这些测点位置是根据障碍物前飘带示踪结果确定的, P1 位于气流反向区, P2 位于气流临界区域, P3 位于障前气流减速区. 根据模型前气流的复杂程度选择 6~10 个测点高度, 并保证每组障碍物前具有三个统一的测点, 即 $0.125h$, $0.375h$ 和 $0.75h$ (h 为障碍物高度). 这样的测点选择既减小了仪器自身干扰, 又可保证获取足够的对比信息. 同时, 在平行于障碍物延伸方向约 15 m 的位置布设了第四台风速仪, 该风速仪位于地表之上 2 m 高度, 用于测量参考风速并作为数据无量纲处理的依据. 根据超声风速仪的安放要求和测速原理, 所有超声风速仪方向标定点正对磁北方向, 因而其水平速度(u)的正方向为正北,

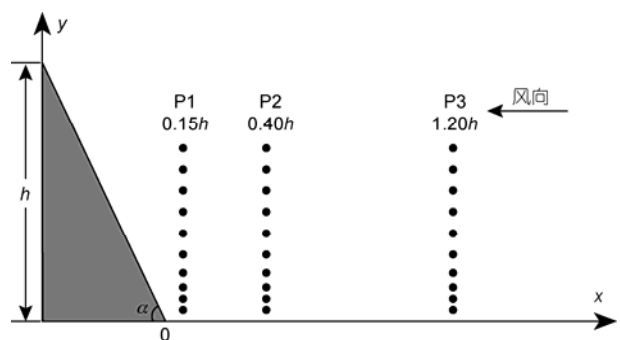


图 1 障碍物迎风侧的风速测量点布置图

图中黑点代表超声风速仪位置

垂直速度(w)正方向为铅垂向上, 而侧向速度(v)的正方向为正西. 在测量过程中, 测量频率设定为 10 Hz, 同步记录 u , v , w 三个速度分量; 每个高度的测量时间为 5 min(即 3000 组数据), 满足统计学要求.

1.2 数据处理

风速大小和风向是影响障前风沙蚀积的重要因素, 在观测时段内(2010-06-03~2010-06-06, 观测时间 10:00~20:30), 2 m 高度处平均风速介于 5.5~7.3 m s⁻¹之间, 风向 SSE, 偶有 SE 和 S 风向. 因此, 参照风速均大于起沙风且自由沙面出现风沙运动, 可以保证所测得的结果具有风沙运移的实际意义; 为了消除来流方向微弱变化的影响, 观测过程中随时调整障碍物走向并保证其与来流方向垂直. 尽管观测时段内来流方向变率很小, 但气流主流方向与超声风速仪水平速度正方向并不完全吻合, 因此在应用测量结果之前需要进行数据预处理, 包括剔除异值和坐标旋转. 本文采用截点滤波法剔除异值^[13], 根据下列公式进行数据坐标旋转^[14]:

$$u = u_x \cos \varphi + v_y \sin \varphi, \quad (1)$$

$$v = -u_x \sin \varphi + v_y \cos \varphi, \quad (2)$$

$$\varphi = \arctan(\overline{v_y} / \overline{u_x}), \quad (3)$$

其中, u_x , v_y , u , v 分别为旋转之前和之后的水平与侧向速度分量, $\overline{u_x}$ 和 $\overline{v_y}$ 分别为每组观测时段内水平和垂直速度的平均值. 经过坐标旋转后, 水平速度 u 的正方向与主流方向一致而侧向速度 v 的平均值为零, 同时保持垂直速度 w 方向不变, 这样就避免了因测量过程中来流方向微弱变化而带来的气流和模型之间存在夹角的问题. 所以, 本文的讨论也仅涉及水平速度 u 和垂直速度 w . 三维超声风速仪较高的采集频率为障前气流湍流分析提供了可能, 因此我们对速度分量进行雷诺分解^[15], 并采用下列公式计算湍流参数^[16,17]:

$$u'_i = \bar{u} - u_i, \quad (4)$$

$$w'_i = \bar{w} - w_i, \quad (5)$$

$$\text{RMS}_u = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n u_i'^2 \right]^{0.5} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{u} - u_i)^2 \right]^{0.5}, \quad (6)$$

$$\text{RMS}_w = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n w_i'^2 \right]^{0.5} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{w} - w_i)^2 \right]^{0.5}, \quad (7)$$

式(4)~(7)中, u'_i , w'_i , u_i 和 w_i 分别是水平和垂直速度的脉动量与瞬时值, RMS_u 和 RMS_w 分别为水平和垂直速度的均方根. 为了便于对比不同高度处的各平均速度和湍流参数, 根据每组观测期间参考点的相应水平速度分量(u_{ref} , 5 min 平均值)对数据结果进行了无量纲处理.

2 结果分析

2.1 平均速度变化

平均速度决定了气流平均携沙能力, 风沙物理学中的大多数输沙率计算公式均建立在平均风速的基础上. 在沙丘动力学研究中, 研究者们也通常采用平均速度计算沙丘不同部位甚至是背风坡的输沙率. 但这样做显然忽略了一个客观存在的事实, 即沙丘背风坡可能存在传统测风设备(如三杯风速仪等)无法准确测量的反向气流. 超声风速仪的一个明显优势是可以区分速度分量和气流方向, 这正是探讨回涡沙丘发育条件的重要前提. 根据野外观测结果, 障碍物前的气流平均速度场存在三个显著的特征, 即水平气流减速、垂直气流加速和较陡障碍物前的气流反向.

2.1.1 水平减速与垂直加速

大量的大气边界层和沙丘动力过程等方面的研究结果证实, 气流在逼近地表障碍物时存在明显的减速过程. 例如, Bowen 和 Lindley^[18], Emeis 等^[19]关于山体与悬崖前的气流场测量证实了迎风侧的气流减速; Lancaster 等^[20]和 Wiggs 等^[21]针对新月形沙丘周围气流速度的野外观测结果表明, 运行至沙丘迎风坡坡脚的气流速度比旷野风速降低了约 11%. 图 2 展示了不同迎风坡坡度障碍物前不同距离处的气流水平速度分量和垂直速度分量廓线. 在气流逼近障碍物过程中, 不同高度处的水平速度出现不同程度的降低, 而且减速率与障碍物迎风坡坡度密切相关. 迎风坡坡度越大, 障前水平速度降低越显著; 距障碍物越近, 减速效应越明显. 从 45°和 50°迎风坡的障碍物前气流速度来看, 在距地表 0.125h 的高度上, P3 位置(障前 1.2h)的水平速度约为参考风速的 65%, 而在紧邻障碍物的 P1 位置(障前 0.15h)则降低至约 30%. 但对于坡度大于 60°的障碍物而言, 在 P3 位置以减速作用为主, 而靠近障碍物时逐渐出现了气流反向. 这说

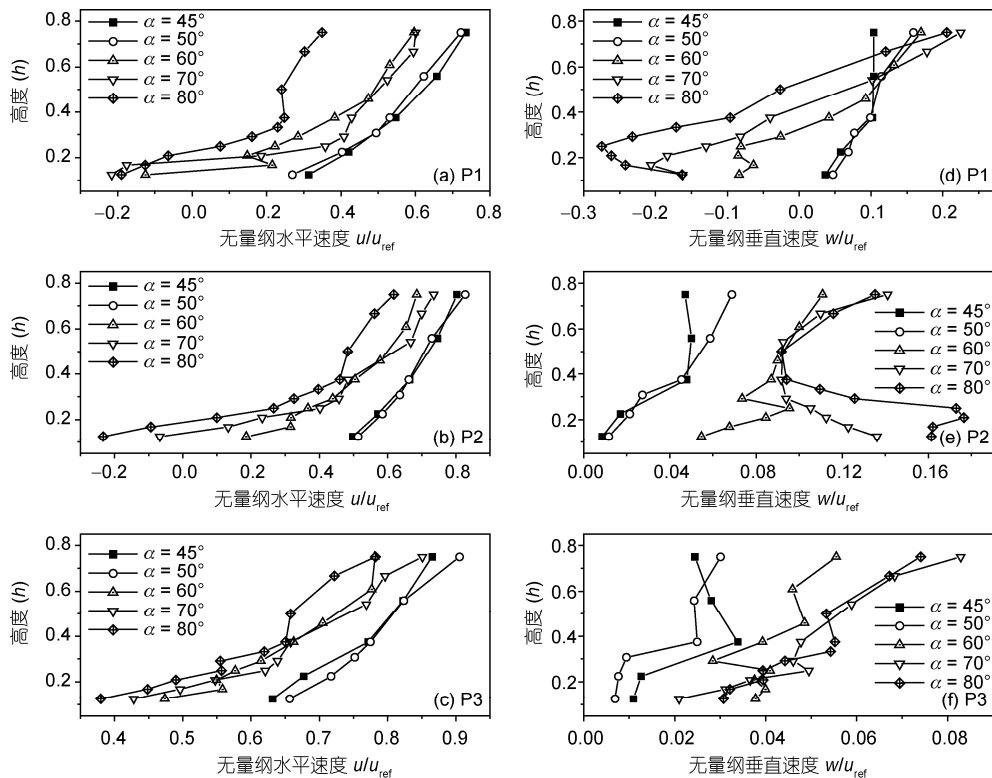


图 2 不同坡度障碍物前水平速度分量((a)~(c))和垂直速度分量((d)~(f))随高度的变化

明, 障碍物坡度越大, 对气流的阻滞作用越强. 图 2 同时表明, 气流垂直速度量值在靠近障碍物过程中出现增大趋势, 距障碍物越近, 垂直速度量值越大. 坡度的影响主要体现在靠近障碍物的 P1 位置, 坡度越陡, 垂直速度量值也越大. 障碍物对其迎风侧气流的影响距离与障碍物高度有关, Tsoar^[8]的风洞实验结果表明, 障前气流减速始于模型上风向约 $3h$ 的位置. 障碍物前气流减速原因可用伯努利原理来解释^[15]: 对于不可压缩流体而言, 气体的动压和静压之和为常数; 障前局部气压增大, 势必造成流速减慢. 从风沙运移角度来看, 障前气流减速可导致携沙能力降低, 风沙流过饱和而造成沙粒在障前堆积, 这也是回涡沙丘得以发育的物质基础.

2.1.2 气流反向

图 2 同时表明, 气流在逼近障碍物时水平速度和垂直速度的方向均发生了改变. 在距障碍物较远的 P3 位置, 所有障碍物前水平速度为正值; 在 P2 位置时, 坡度为 70° 和 80° 的障碍物前出现了水平速度负值. 而在 P1 位置, 所有大于 60° 的障碍物前水平速度

均为负值. 从垂直速度分布来看, P2 和 P3 位置均为上升气流, 而在 P1 位置, 坡度小于 60° 的障碍物前仍为上升气流, 坡度大于 60° 的障碍物前出现了下沉气流, 紧邻障碍物下部的气流出现了向上和向下运动的分野. 综合考虑水平和垂直速度方向变化, 可以认为, 在大于 60° 的障碍物前存在一个反向涡. 尽管利用超声风速仪难以精确测量这些反向涡, 但飘带示踪的结果也可粗略揭示其形态特征. 不同障碍物前水平和垂直速度反向的特征参数(反向区宽度和高度, 以模型高度的倍数 h 表示)如图 3 所示.

对于水平速度而言, 不同坡度障碍物前的反向区宽度介于 $0.31\sim 0.70h$ 之间, 高度变化在 $0.14\sim 0.24h$ 之间, 均随障碍物迎风坡坡度的增大而增大. 垂直速度出现反向的宽度在 60° 迎风坡时为 $0.40h$, 随坡度增大而减小至 $0.26h$; 垂直速度出现反向的高度随坡度增大而增大, 变化范围介于 $0.33\sim 0.57h$ 之间. 这些变化规律表明, 在大于 60° 的障碍物前 $0.3\sim 0.4h$ 处存在气流的分离, 而 Tsoar^[8]的风洞模拟结果也表明, 回涡沙丘一般发育在障碍物上风向 $0.3h$ 或更远, 这与野外观测的结果具有较高的一致性. 障前气流运

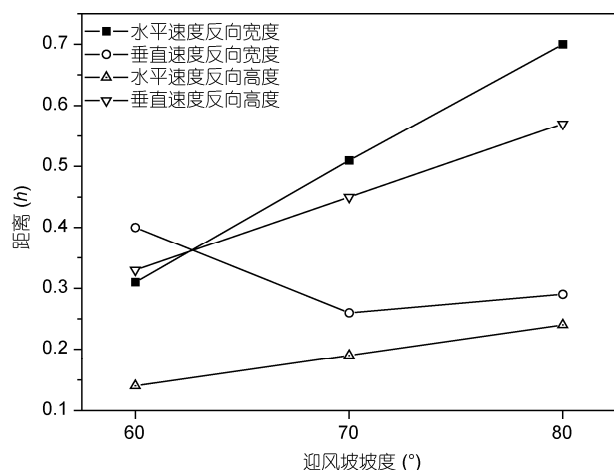


图3 不同坡度障碍物前气流反向特征参数

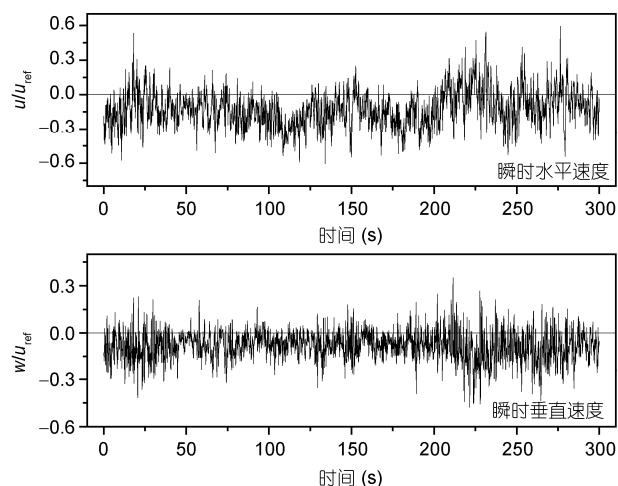
动方向的改变可直接影响沙粒运移规律, 水平速度反向并与原始气流碰撞、垂直气流下沉并叠加在沙粒沉降过程中, 均可加速沙粒在障前发生堆积, 这种气流模式为回涡沙丘形成发育提供了动力条件。

2.2 湍流强度变化

有研究表明, 瞬时的阵风足以导致地表沙粒起动, 间歇性跃移是沙粒运移的主要方式, 因此气流湍流特性对风沙运动的发生、传输和沉积过程都起着非常重要的控制作用^[22-26]。在沙丘动力学研究中, 研究者也采用各种湍流参数来描述湍流结构对沙丘发育的影响^[21,27-29]。

野外观测结果表明, 障碍物前气流存在明显的速度脉动, 其特征与障碍物形态有关。如图4所示, 尽管平均速度结果表明, 迎风坡坡度为60°的障碍物前P1位置表现为水平反向、垂直向下的气流运动模式, 但图4却反映出该位置气流存在瞬时的水平正向和垂直上升运动; 这种含能较大的低频脉动与沙粒跃移过程关系密切^[30], 障前回涡沙丘的发育过程也会受其影响。Sterk等^[31]和Leenders等^[32]认为, 相对于雷诺应力而言, 水平速度脉动与沙粒跃移的相关性更好; 据文献^[33], von Karman则认为, 湍流的垂直分量对沙粒起动是非常重要的。因此, 有必要探讨不同坡度障碍物前水平和垂直速度的湍流特征。

根据湍流强度计算结果(图5), 水平和垂直速度湍流强度随障碍物迎风坡坡度、与障碍物之间距离以及距地表高度等因素而发生变化。从水平速度湍流强度变化来看, 距障碍物越远湍流强度越小; 在P3

图4 60°迎风坡障碍物前P1位置的气流瞬时速度
高度为0.125h

位置湍流强度随高度变化不大, 而在距障碍物较近的P2位置随高度减弱, 在P1位置则表现为先增强后减弱, 最大湍流强度出现在反向气流最大高度附近。可见, 障碍物迎风坡坡度显著影响湍流强度, 坡度越陡, 湍流越强, 垂直速度湍流强度变化亦表现出类似的规律, 但P3位置比P1和P2位置的湍流强度低一个量级, 说明障碍物对垂直速度湍流强度的影响仅限于靠近障碍物的较低位置。值得注意的是, 在所有迎风坡大于60°的障碍物前, P1位置垂直速度湍流强度最大值出现在水平速度反向的最大高度处, 而与垂直速度的反向高度无关。

目前有关湍流对沙粒运移过程影响的研究还很薄弱, 湍流结构对沙丘发育动力过程的控制作用还不完全明确, 因此还存在巨大的探索空间^[4]。障碍物前气流湍流强度的变化规律表明, 障碍物形态对湍流结构起着重要控制作用, 但湍流结构自身对障前沙粒运移和回涡沙丘形成和发育过程产生何种程度的影响, 还需要进一步探索。毋庸置疑的是, 由于气流速度的瞬时脉动和湍流发育, 采用时间平均的风速(或摩阻风速)来预报沙粒传输过程, 必然会与实际情况之间存在较大差异。

3 关于障前气流结构与回涡沙丘发育的讨论

尽管前人针对回涡沙丘的形成与发育条件曾提

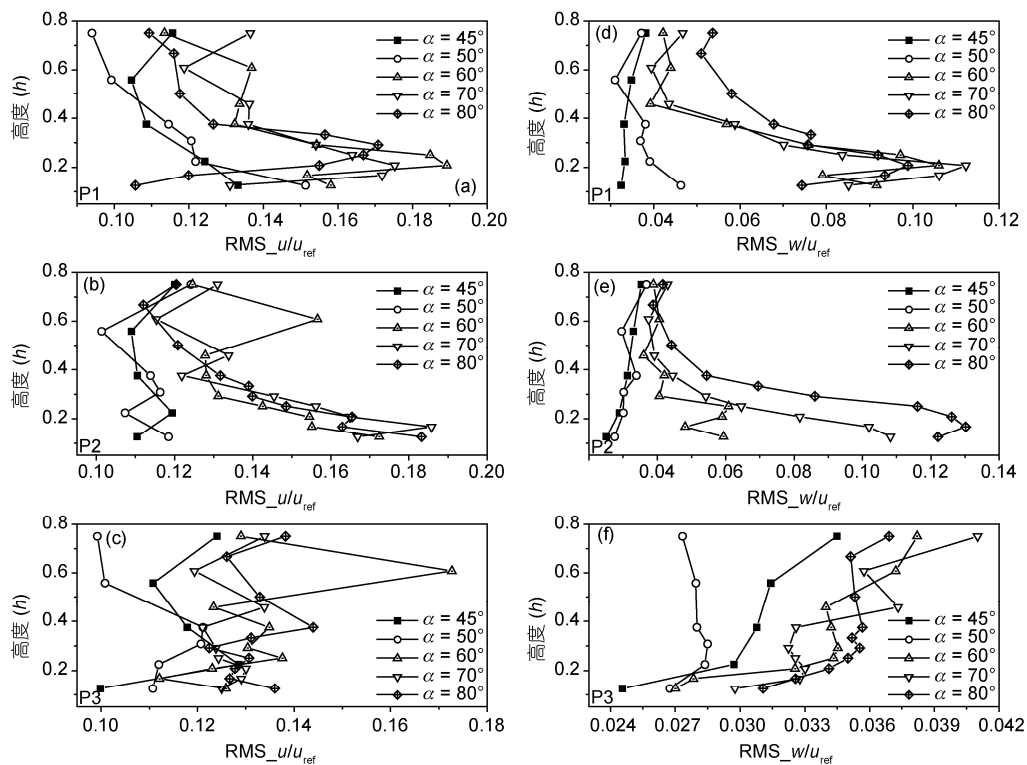


图 5 不同坡度障碍物前水平速度((a)~(c))和垂直速度((d)~(f))湍流强度变化

出沙粒与障碍物撞击反弹、障前气流反射以及存在直立涡旋等各种观点^[5-8], 但任何形态沙丘的形成与发育都离不开特定的沙源和风况条件^[3]. 根据不同坡度障碍物前气流平均速度和湍流强度的分析结果, 障前气流减速造成的风沙流过饱和堆积为回涡沙丘形成提供了物质基础, 而水平和垂直速度反向不仅加速了沙粒堆积过程, 也是堆积沙粒演变为沙丘形态的动力条件. Tsoar^[8]通过风洞实验提出气流出现反向的临界迎风坡坡度为 55° , 在此坡度以下沙粒可沿坡爬升并形成爬坡沙丘; 坡度为 60° 的障前尽管存在回旋涡流, 但其强度较弱不足以造成沙粒反向运动, 且长时间沙粒堆积之后可转化为爬坡沙丘.

野外实测的气流场结果表明, 迎风坡坡度大于 60° 的障碍物前存在明显的反向涡旋; 坡度越陡, 反向涡的水平延伸长度越大、垂直高度越高(图 6), 此种条件下是有利于回涡沙丘形成发育的. 水平气流反向并与原始正向气流碰撞, 导致了障前低速区的出现, 气流携沙能力降低并开始发生堆积; 垂直气流下沉运动, 垂直速度分量作用于运移沙粒, 加速了其堆积过程. 障前气流反向区的宽度和高度随坡度增

大而增大, 这也说明障碍物越陡, 沙粒堆积以及沙丘开始发育的位置越远. 初始沙丘形态形成之后, 沙丘自身也成为风沙流运行的障碍, 沙丘表面气流结构类似于横向沙丘, 即迎风坡气流加速, 沙丘顶部开始气流分离并在背风侧形成反向涡^[34]. 在此情况下, 沙丘背风侧的次生流与障前的反向气流叠加, 如果其强度大于正向运动气流, 则加剧风沙堆积过程; 如果二者强度相当, 则将在沙丘顶部附近达到平衡, 回涡沙丘也逐步发育至均衡状态. 此时, 障碍物和沙丘共同作用导致的气流湍流作用得以进一步加强, 沙丘并非处于固定状态, 其背风侧沙粒将会在横滚涡轴的作用下沿障碍物侧向搬运^[8,35], 回涡沙丘因此而达到动态平衡.

此外, 回涡沙丘的形成不仅与障碍物迎风坡坡度有关, 还深受障碍物几何特征(如高度、延伸长度、形状等)的影响. Tsoar^[8]的风洞模拟结果表明, 障碍物高度越高, 障前开始的积沙位置就越远, 这是因为障前气流减速和反向区的几何尺度均与障碍物高度成比例. 来流方向对障前回涡沙丘的形成也起着重要的控制作用, Liu 等^[11]的风洞模拟结果表明障前出

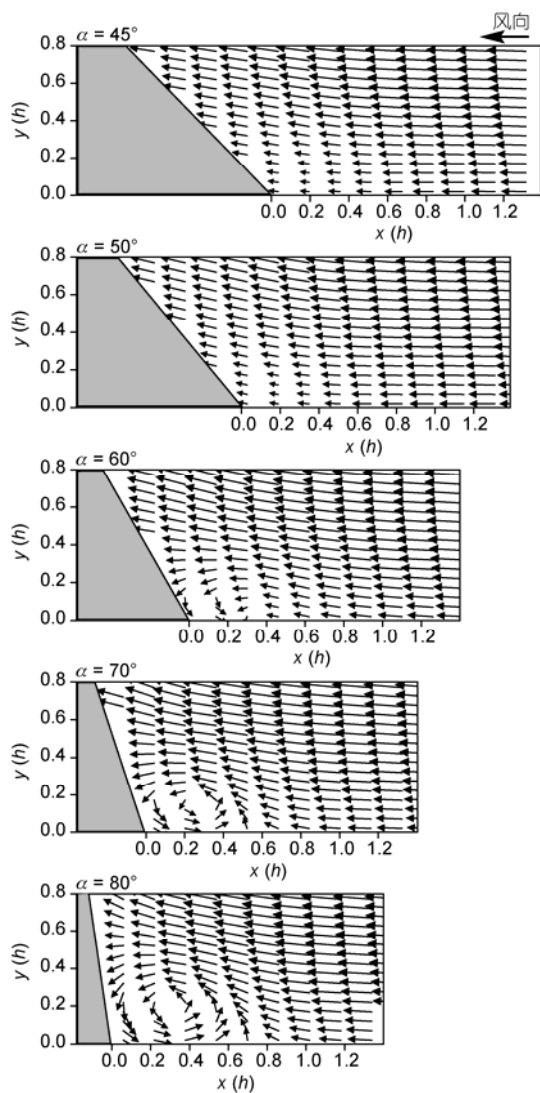


图6 不同坡度障碍物前的速度矢量

现回旋涡流的临界迎风坡坡度会随着其与来流夹角的增大而变小; 即便在回涡沙丘形成之后, 风向变化也可导致短期的、不利于回涡沙丘发育的风况条件, 这对其形态发育过程具有较大影响. 在有利于回涡沙丘形成的障碍物前, 风速大小、沙源供应多寡均会影响回涡沙丘的演化, 较大的风速和丰富的沙源可

以促进回涡沙丘尺度发育, 因而回涡沙丘的形态特征和物质组成在一定程度上反映了区域风沙环境. 对透风型障碍物而言, 其透风程度和走向(与来流风向之间夹角)是控制障前沙粒堆积和沙丘发育的主要因子, 如对防沙栅栏而言, 疏透度过大或与来流风向夹角过小, 往往会造成风沙直接堆积在栅栏底部而形成沙埋.

4 结论

综上所述, 回涡沙丘形成发育过程中存在复杂的次生流作用. 不同坡度障碍物前的速度场测量结果表明, 障前气流平均速度和湍流强度均受控于迎风坡坡度, 坡度小于 60° 的障碍物前以减速作用为主, 而坡度大于 60° 的障碍物前气流水平速度和垂直速度均出现不同程度的反向运动, 气流水平和垂直反向区的宽度和高度与障碍物迎风坡坡度有关, 总体表现为坡度越陡, 反向区域越大. 障碍物迎风坡坡度影响水平和垂直速度湍流强度, 距障碍物越近, 湍流越强. 风沙堆积和回涡沙丘发育过程与障前气流结构密切相关, 障碍物影响下的次生流是回涡沙丘形成的动力条件, 沙丘形成之后自身导致的次生流与之叠加, 从而控制回涡沙丘的发展演化过程, 直至达到动态均衡.

回涡沙丘形成发育过程中复杂的次生流作用不同于自堆积沙丘, 采用超声风速仪进行气流平均速度和湍流强度测量, 为深入理解地形障碍沙丘的形成发育过程提供了可能. 尽管前人提出回涡沙丘发育存在确定的临界坡度, 但临界条件下有利于回涡沙丘发育的气流结构必定非常接近地表, 超声风速仪的体积限制了其对近地表气流结构的测量, 因此本文仅就气流结构及其对回涡沙丘发育的影响做了探讨而并未涉及临界坡度问题. 对回涡沙丘形成条件和发育过程的深入认识, 还需要针对障碍物形态特征、来流方向变化、风速大小和沙源供应等影响因素, 开展进一步的实验和观测研究.

致谢 感谢审稿专家提出的宝贵意见.

参考文献

- 1 Cooke R U, Warren A, Goudie A. Desert Geomorphology. London: UCL Press, 1993. 526

- 2 Pye K, Tsoar H. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2009. 458
- 3 Lancaster N. *Geomorphology of Desert Dunes*. London: Routledge, 1995. 290
- 4 Livingstone I, Wiggs G, Weaver C M. Geomorphology of desert sand dunes: A review of recent progress. *Earth-Sci Rev*, 2007, 80: 239–257
- 5 Bagnold R A. *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*. London: Methuen, 1941. 265
- 6 彼特洛夫 M. 沙漠内新月形沙丘地形及其形成规律. 见: 陈治平, 陈永宗, 刘西平, 等, 编. 沙漠地貌的起源及其研究方法. 北京: 科学出版社, 1962. 53–97
- 7 Embleton C, Thornes J, Warren A. The nature of fluid motion. In: Embleton C, Thornes J, eds. *Process in Geomorphology*. London: Edward Arnold, 1979. 39–72
- 8 Tsoar H. Wind tunnel modeling of echo and climbing dunes. In: Brookfield M E, Ahlbrandt T S, eds. *Eolian Sediments and Processes*. Amsterdam: Elsevier, 1983. 247–259
- 9 李森, 王跃, 哈斯, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌分类与发育问题. *中国沙漠*, 17: 342–350
- 10 李森, 董光荣, 申建友, 等. 雅鲁藏布江河谷风沙地貌形成机制与发育模式. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 1999, 29: 88–96
- 11 Liu X W, Li S, Shen J Y. Wind tunnel simulation experiment of mountain dunes. *J Arid Environ*, 1999, 42: 49–59
- 12 哈斯, 王贵勇, 董光荣. 沙丘背风侧气流及其沉积类型与意义. *沉积学报*, 2001, 19: 96–100
- 13 范金城, 梅长林. *数据分析*. 北京: 科学出版社, 2002. 411
- 14 Walker I J. Physical and logistical considerations of using ultrasonic anemometers in aeolian sediment transport research. *Geomorphology*, 2005, 68: 57–76
- 15 Tennekes H, Lumley J. *A First Course in Turbulence*. Cambridge: The MIT Press, 1994. 300
- 16 Bennett S J, Best J L. Mean flow and turbulence structure over fixed, 2-D dunes: Implications for sediment transport and bedform stability. *Sedimentology*, 1995, 42: 491–514
- 17 Venditti J G, Bauer B O. Turbulent flow over a dune: Green River, Colorado. *Earth Surf Process Landf*, 2005, 30: 289–304
- 18 Bowen A J, Lindley D. A wind-tunnel investigation of the wind speed and turbulence characteristics close to the ground over various escarpment shapes. *Bound-Layer Meteor*, 1977, 12: 259–271
- 19 Emeis S, Frank H, Fiedler F. Modification of air flow over an escarpment: Results from the Hjärdemal experiment. *Bound-Layer Meteor*, 1995, 74: 131–161
- 20 Lancaster N, Nickling W G, Neuman C K M, et al. Sediment flux and airflow on the stoss slope of a barchan dune. *Geomorphology*, 1996, 17: 55–62
- 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. *Geomorphology*, 1996, 17: 29–46
- 22 Stout J E, Zobeck T M. Intermittent saltation. *Sedimentology*, 1997, 44: 959–970
- 23 Butterfield G R. Transitional behaviors of saltation: Wind tunnel observations of unsteady winds. *J Arid Environ*, 1998, 39: 377–394
- 24 李振山, 倪晋仁. 风沙流中风速脉动的实验测量. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11: 352–360
- 25 Bass A C W. Wavelet power spectra of aeolian sand transport by boundary layer turbulence. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L05403, doi: 10.1029/2005GL025547
- 26 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等. 典型下垫面风沙流中风速脉动特征研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36: 1163–1169
- 27 Castro I P, Wiggs G F S. Pulsed wire anemometry on rough surface, with application to desert sand dunes. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, 1994, 52: 53–71
- 28 Walker I J, Nickling W G. Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dune in a wind tunnel. *Earth Surf Process Landf*, 2003, 28: 1111–1124
- 29 Dong Z, Qian G, Lu P, et al. Turbulence fields in the lee of two-dimensional transverse dunes simulated in a wind tunnel. *Earth Surf Process Landf*, 2009, 34: 204–216
- 30 刘江, 王元, 杨斌. 高频测量输沙浓度对湍流脉动的频率响应. *西安交通大学学报*, 2010, 44: 113–118
- 31 Sterk G, Jacobs A, Van Boxel J H. Effect of turbulent flow structures on saltation sand transport in the atmospheric boundary layer. *Earth Surf Process Landf*, 1998, 23: 877–887
- 32 Leenders J K, Van Boxel J H, Sterk G. Wind forces and related saltation transport. *Geomorphology*, 2005, 71: 357–372
- 33 董治宝. 风沙起动形式与起动假说. *干旱气象*, 2005, 23: 64–69
- 34 Dong Z, Qian G, Luo W, et al. A wind tunnel simulation of the effects of stoss slope on the lee airflow pattern over a two-dimensional transverse dune. *J Geophys Res*, 2007, 112: F3019, doi: 10.1029/2006JF000686
- 35 Tsoar H, Blumberg D. The effect of sea cliffs on inland encroachment of aeolian sand. *Acta Mech*, 1991, 2(Suppl): 131–146