

横向沙丘表面气流湍流特征野外观测

张正偲, 董治宝

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

摘要: 沙丘形态动力学特征是风沙地貌的重要研究内容之一, 受观测技术等限制, 现有的关于沙丘形态动力学特征的研究成果还不能满足沙丘形成与演化过程研究的需要。利用三维超声风速仪对腾格里沙漠的横向沙丘表面气流特征进行野外观测, 结果表明, 沙丘脊线和迎风坡中部的气流均为未偏向流, 而沙丘背风坡不同高度的气流包括反向流, 偏向流和未偏向流。湍流强度、雷诺应力和气流丰富度随气流方向变化而变化, 其在沙丘脊线和中部的变化趋势比较简单且有大致相似的规律, 而其在沙丘背风坡不同高度比较复杂。

关键词: 反向流; 湍流强度; 雷诺应力; 气流丰富度

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2015)05-0652-06

引 言

沙丘的形成与演化过程是区域内部环境与外部环境相互作用的结果^[1]。风况是沙丘形成的动力条件, 沙丘的形成与演化过程不仅受大气环流, 同时受局地气流的影响。宏观上, 区域风况受大气环流的控制, 风况不同, 所形成的沙丘类型不同。微观上, 地形、地表障碍物等改变局地气流的发展, 如背风侧分离流、地形旋转流、反向流和偏向流等。沙丘形态动力学特征是风沙地貌研究的重要内容之一。风沙地貌经过100多年的发展, 在沙丘的形态、动力学过程, 形成与演化方面取得了丰硕的成果^[2-25]。但目前还存在以下几个方面的不足。

1) 以单个、二维沙丘模型研究为主。自然界的沙丘多以连续分布的三维形态存在, 所以利用现有的研究成果来模拟沙丘动态过程和移动, 仍然是一个难以解决的挑战。

2) 以平均气流研究为主。以往受观测手段的限制, 对沙丘表面的气流特征的研究主要以平均状态为主。然而, 沙丘表面风沙流的运动和沙丘移动过程, 是由包括背风坡气流在内的所有复杂的、三维起沙风决定的。

3) 以室内、数值模拟研究相对较多。室内实

验虽然能够快速研究单个沙丘的气流场特征, 但由于实验的相似性以及难以模拟风向变化, 从而限制了其在风沙地貌形成与演化过程的应用。随着计算机技术的发展, 数值模拟在风沙地貌中的应用逐渐增多, 虽可以较快地模拟沙丘的演化过程, 但由于风沙地貌演化的时空复杂性, 很难真实反映沙丘的演化过程, 同时, 由于野外观测资料缺乏, 数值模拟结果难以进行对比。

4) 对风向研究不足。Bauer等研究表明, 风向对风沙地貌形成与演化过程的影响与风速具有相同重要的作用^[16], 近年来, 风沙地貌学者注意到斜向气流对沙丘表面风沙流运动及气流属性起着重要作用^[13-16]。风向不仅影响沙丘沙丘表面气流结构属性, 而且影响气流的湍流特征, Chapman等人研究发现, 风向影响雷诺应力、风速和雷诺应力分布特征^[21]。

尽管人们认为气流湍流对解释风沙流输送至关重要, 不同学者曾尝试用湍流强度、雷诺应力、水平方向雷诺应力、垂直方向雷诺应力、湍流结构、湍流动能、气流丰富度、变异系数等参数来解释气流湍流特征与风沙流和沙丘移动的关系^[23]。但由于气流加速/减速, 气流流线曲率效应和雷诺应力的关系非常复杂, 以至于目前还没有找到一

收稿日期: 2014-01-07; 修订日期: 2014-03-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101007)、国家重大科学研究计划(2013CB956000)、中国科学院西部之光项目、国家国际科技合作专项项目(2011DFA11780)资助。

作者简介: 张正偲(1979-), 男, 甘肃靖远人, 副研究员, 博士, 主要从事风沙物理和风沙地貌研究。E-mail: zhangzhisi@sina.com

个合适的解释风沙流运动和沙丘移动的湍流参数。本研究利用三维超声风速仪,选择目前学者比较认可的影响近地层风沙流运动和沙丘移动的参数,如湍流强度、雷诺应力和气流丰富度,来探讨沙丘表面不同位置气流方向的变异规律,以及由于地形导致的湍流参数的变异特征,为风沙地貌形成与演化过程提供理论依据。

1 研究区概况及数据分析方法

1.1 研究区概况

研究区位于腾格里沙漠东南缘,中卫市西北角(105°01'E, 37°33'N)的中国科学院风沙科学观测场。观测场地区沙丘类型有:格状沙丘、反向沙丘及横向沙丘。沙丘表面粒度在0.22~0.26 mm之间;根据风沙观测场的观测数据,该地区年平均风速2.48~2.79 m/s,多年平均输沙势75VU;风向主要以西北风为主,其次为东北风;年平均空气湿度在36.51%~45.40%之间;年平均温度在11.21~12.65℃;年降雨量在71.44~116.60 mm之间。

1.2 野外观测及数据处理方法

本次试验选择平坦沙地上发育的横向沙丘为研究对象,沙丘高度2.2 m,迎风坡12°,背风坡坡度30°,沙丘间距20 m。风速观测采用Gill公司生产的WindMaster(Pro)超声风速仪,观测点分别为背风坡坡脚(0.31、0.59和1.4 m)、迎风坡中部(0.6和1.4 m)和迎风坡脊线附近(0.32和0.58 m),并在观测沙丘的上一个沙丘安装一个对照超声风速仪,高度为2.2 m。超声风速仪采集频率为10 Hz,同时记录 u 、 v 、 w 方向的风速。超声风速仪采集的数据保存在CR1000上。观测期间的风向为西北风。

采集的数据首先进行数据野点处理和坐标转换^[22]。水平方向的湍流强度根据以下公式计算^[22]:

$$T_{Tu} = \frac{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i'^2) \right]^{0.5}}{\bar{u}} \quad (1)$$

式中, T_{Tu} 为水平湍流强度, u 为风速(m/s), u_i' 为第 i 次风速湍流值(m/s), \bar{u} 为平均风速(m/s), n 为观测期间的总风速次数。

雷诺应力(RS)广泛应用于风沙研究中,但近年来的研究表明,水平雷诺应力可能对反应风沙运动更有意义^[21],所以本文仅讨论水平雷诺应力,其计算公式如下:

$$R_u = \overline{u_i'^2} \quad (2)$$

式中, R_u 为水平雷诺应力(m²/s), u_i' 为第 i 次风速湍流值(m/s)。

象限分析能够比较直观反映近地层湍流猝发过程的频率分布情况^[23],有助于解释风沙流产生机理和沙丘移动特征。第一象限为向外的相互作用(outward interactions, $u'>0, w'(\text{垂直风速})>0$),第二象限为溅射作用(ejections, $u'<0, w'>0$),第三象限为向内相互作用(inward interactions, $u'<0, w'<0$),第四象限为蠕移作用(sweeps, $u'>0, w'<0$)。但是,目前在风沙研究中,还没有一个比较理想的关于象限分析过程临界值(H_{sd})的确定办法,所以本文依据前人的研究经验,临界值为雷诺应力的一个标准差^[19,21,25-27]。气流丰富度(Flow exuberance)表示象限频率分布的形态,根据Chamman等的定义计算:

$$EX_{FL} = \frac{\text{第一象限} + \text{第三象限}}{\text{第二象限} + \text{第四象限}} \quad (3)$$

2 结果与讨论

2.1 地形对气流方向的影响

地形改变近地层气流的发育,特别是背风坡气流的发育。沙丘脊线的气流方向与主风向夹角不同,则背风侧气流形式不同,但目前关于此方面的研究较少且存在争议^[13,14,16]。背风坡气流的发育特征对风沙地貌的形成与演化过程具有重要意义:如背风坡反向气流范围是控制沙丘间距的重要因子;尽管目前对偏向气流的意义不太明确,但从我们野外观察发现,偏向气流对复杂沙丘,如格状沙丘副梁的形成可能起着重要作用。脊线气流方向不同,沙丘表面不同位置的气流方向亦不同(图1)。当风向为西北风(315°)时,沙丘脊线和中部的气流总体为未偏向,而在沙丘背风坡坡脚,气流比较复杂,包括反向气流和偏向气流。当沙丘脊线气流方向为270°~290°时,背风坡坡脚不同高度气流主要为偏向气流,并且有向反向气流变化的趋势。当沙丘脊线气流方向为290°~315°时,背风坡不同高度气流包括反向流和偏向流:0.31 m高度气流为反向流,0.59和1.40 m高度为偏向气流。当沙丘脊线气流方向为315°~330°时,0.31和0.59 m高度主要为反向气流,但1.40 m高度既有反向流,又有偏向流。当沙丘脊线气流方向大于330°时,背风坡不同高度主要为偏向流。

沙丘高度、间距、迎风坡角度、背风坡坡度、风速风向和气流入射角度均影响沙丘表面气流的发

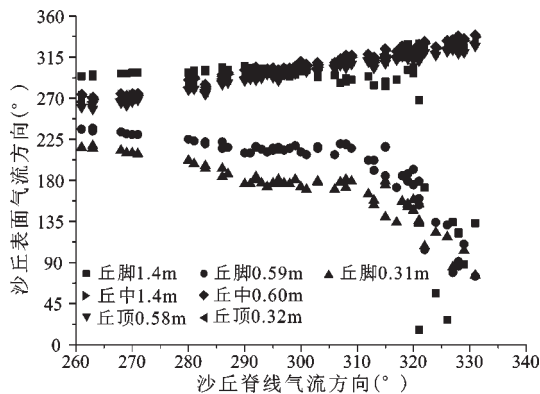


图1 沙丘脊线和表面气流方向

Fig.1 The relationship of air flow direction between sand ridge and dune surface

展。在横向气流条件下,背风侧气流包括6个分区:外流区、溢流区、上层尾流区、下层尾流区、分离泡和内边界层^[5,8,15-18]。分离泡是背风侧气流特征的有效描述方法,其形态特征(高度、面积和形状比)反映了气流的变化特征,气流重附距离一般在 $4.8\sim 10.8H$ 之间(H 为沙丘高度),并随迎风坡坡度增加逐渐增加^[5,8]。气流垂直于沙丘脊线时,单个沙丘背风侧气流的重附距离要比连续沙丘的大^[18]。本实验表明,在连续分布的横向沙丘,沙丘迎风坡中部0.50 m高度气流方向为未偏向,因此,沙丘中部气流已超出分离泡的范围,属于溢流区^[5]或混合区^[17]。由沙丘中部气流的方向可以推知,沙丘背风侧气流的重附距离在沙丘中部与沙丘背风坡坡脚之间,重附距离小于 $4H$,而这个距离与前人的研究结果相比要小^[5,8,17,18],这主要是由于前人多是通过风洞实验和数值模拟的方法,而风洞实验和数值模拟的测试条件属于理想状态,这必然造成分析结果偏大。本实验由于测点较少,仅能够得到重附距离的粗略范围,下一步将加密野外观测的测点,进一步完善野外观测。

分离泡的高度可能高于沙丘,也有可能低于沙丘,这主要取决于迎风坡坡度^[8]。在分离泡高度以下,气流为反向流,而分离泡以上,气流为未偏向流。野外观测表明,对同一沙丘,气流分离与脊线气流方向密切相关,气流方向在 $290^\circ\sim 330^\circ$ 时,近地层0.31 m高度处于分离泡的下层,气流为反向流,这就意味着分离泡的高度在0.31 m以上;但随高度的增加(0.59 m),反向流仅出现在脊线气流方向为 $315^\circ\sim 330^\circ$ 范围,这就意味着分离泡的高度在0.59 m高度以上。

2.2 地形对湍流强度的影响

地形不仅影响沙丘背风测气流方向,而且影响气流的湍流特征,气流方向不同,近地层气流到达沙丘脊线的风程长度不同,而风程长度是影响近地层风沙流运动的重要因子。Chapman等研究发现,风向影响沙丘表面气流的雷诺应力、风速和气流丰富度^[21]。图2为气流方向与湍流强度的变化趋势图。对于反向气流,湍流强度为正值,而对于偏向气流,当偏向于东北方向时,湍流强度为正值,而当偏向于西南方向时,湍流强度为负值。沙丘脊线的湍流强度随气流方向总体表现为先增加后减小。湍流强度随气流方向的变化而变化:沙丘中部的气流方向在一定范围内(如1.4 m高度 $<275^\circ$,0.6 m高度 $<285^\circ$),湍流强度先减小后增加;而在 $>290^\circ$ 时,逐渐减小;沙丘坡脚的湍流强度在0.6 m高度大于0.4 m高度。沙丘坡脚1.4 m高度,湍流强度在气流方向 $<180^\circ$ 时先减小后增加,在 $>180^\circ$ 时先增加后减小;0.59和0.31 m高度在气流方向 $<180^\circ$ 时呈波浪变化,而在 $>180^\circ$ 时逐渐增加。

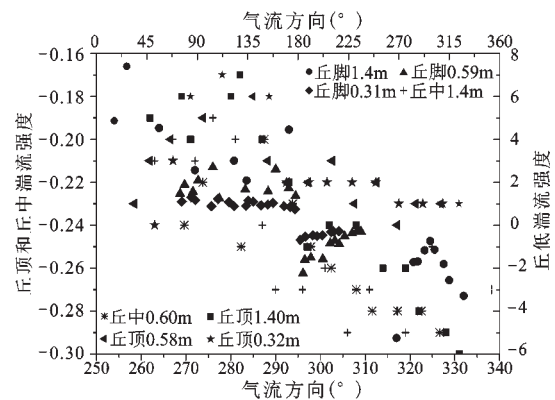


图2 沙丘表面不同部位湍流强度与气流方向的关系

Fig.2 The relationship between turbulence intensity and air flow direction over dune surface

湍流强度不仅随气流方向的变化而变化,同时不同高度的湍流强度亦不同。脊线的湍流强度随气流方向变化而变化,流方向小于 270° 时,湍流强度由1.4、0.58、0.32 m,依次减小; $270^\circ\sim 360^\circ$ 之间,由1.4、0.58、0.32 m,依次增加。沙丘坡脚,当气流方向为 $0^\circ\sim 180^\circ$ 之间时,1.40 m高度湍流强度最大,其次为0.59和0.31 m,而在气流方向为 $180^\circ\sim 360^\circ$ 之间,0.31 m高度最大,其次为0.59和1.4 m高度。坡脚1.4 m高度,当气流属于反向和偏向北

时,湍流强度随气流方向体现为波浪状变化,在 45° 左右达到最小值,在 150° 左右达到最大值;当气流为偏向气流且偏向西时,湍流强度先增加后降低,在 290° 左右达到最大值(绝对值最小)。坡脚 0.59 m ,当气流属于反向和偏向北时,湍流强度随气流方向亦体现为波浪状变化,但最小值对应的气流方向为 110° 左右,在 150° 左右达到最大值;当气流为偏向气流且偏向西时,湍流强度体现为连续增加。在背风坡坡脚 0.31 m ,当气流属于反向和偏向北时,湍流强度随气流方向无明显变化趋势;当气流为偏向气流且偏向西时,湍流强度体现为连续增加。

2.3 地形对水平雷诺应力的影响

尽管目前关于近地层雷诺应力与风沙流关系的研究不多,但人们还是认为雷诺应力以及湍流结构对风沙流起着重要作用^[27]。近年来,风沙学者认为水平雷诺应力对风沙流运动和沙丘移动亦起着重要作用,对于新月形沙丘,水平雷诺应力在迎风坡坡脚增大,但在沙丘脊线降低^[23]。图3为沙丘表面不同位置不同高度水平雷诺应力随气流方向变化图。沙丘背风坡坡脚 0.59 m 和 0.31 m 高度的水平雷诺应力总体表现为先减小后增加然后减小,但在局部气流范围内有微小的变化;而 1.4 m 高度总体表现为先增加后减小。沙丘脊线和中部,水平雷诺应力总体表现为先增加后降低,同样在局部气流范围内有微小的变化有减小的趋势。

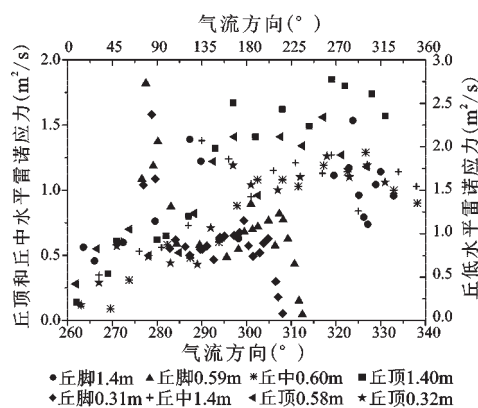


图3 沙丘表面不同部位雷诺应力与气流方向的关系

Fig.3 The relationship between Reynolds stress and air flow direction over dune surface

沙丘脊线气流方向 $<270^\circ$ 时,水平雷诺应力在 0.58 m 高度大于 1.4 m 和 0.32 m 高度; $>270^\circ$ 时由

1.4 m , 0.58 m 和 0.32 m 依次减小。沙丘中部和沙丘坡脚水平雷诺应力随高度变化的趋势不是很明显。

目前关于雷诺应力与风向关系的研究并不多见,Chapman等研究发现,当沙丘脊线为 $76^\circ/256^\circ$,气流方向在 $30^\circ\sim 47^\circ$ (与主风向夹角 $44^\circ\sim 61^\circ$)范围变化时,雷诺应力与气流方向线性相关^[21],背风坡坡脚下部和迎风坡中部上部位置雷诺应力随风向增加而降低,其余位置相反。本研究结果表明,当沙丘表面气流方向 $260^\circ\sim 271^\circ$ (对应于Chapman等人2012的与主风向夹角 $44^\circ\sim 61^\circ$)时,沙丘脊线水平雷诺应力随气流方向增加而降低;沙丘中部水平雷诺应力随气流方向增加而增加;沙丘背风坡上部水平雷诺应力随气流方向先降低后升高,而背风坡中部和下部水平雷诺应力随气流方向降低。

2.4 地形对气流丰富度的影响

气流湍流在不同象限的分布特征可以揭示沙丘表面风沙流运动的动态差异并有助于解释风沙流产生机理和沙丘移动特征。气流丰富度反应的是雷诺应力产生过程4个象限负和正作用分布的比例。当丰富度接近1时,4个象限均匀分布;丰富度大于1时,以第一和第三象限作用为主,其不利于雷诺应力的产生和沙粒起动,风沙流以沉降为主;丰富度接近0时,主要以第二和第四象限作用为主,此时,有助于雷诺应力的产生、沙粒起动和风沙流运动。气流丰富度与气流方向有一定的关系,且气流丰富度的产生过程是由地形引起的气流压缩和流线曲率效应造成的气流动态过程和湍流产生过程^[21]。

图4为沙丘表面气流丰富度随风向的变化趋势,由图可以看出,沙丘脊线 0.58 m 和 0.32 m ,沙丘中部 0.60 m 高度气流丰富度均大于1。沙丘脊线下层的气流丰富度大于上层的气流丰富度,这就说明随高度增加,雷诺应力降低;而沙丘中部的下层高度气流丰富度大于1,这说明在沙丘中部,气流对沙粒运动的作用完全相反。Chapman等认为迎风坡坡脚以Q2和Q4为主,而脊线以Q1和Q3为主^[21],但其没有考虑风向的影响,事实上,由本研究及其他人的研究表明,沙丘脊线气流方向对背风坡坡脚气流方向、雷诺应力、风速和气流丰富度有显著的影响,从而导致气流丰富度的复杂性。沙丘表面不同位置气流丰富度的变化随背风坡气流属性变化而变化,对于偏向气流,坡脚以Q2和Q4为主;对于反向气流,气流丰富度比较复杂,坡脚以Q1和Q3为主(图4)。

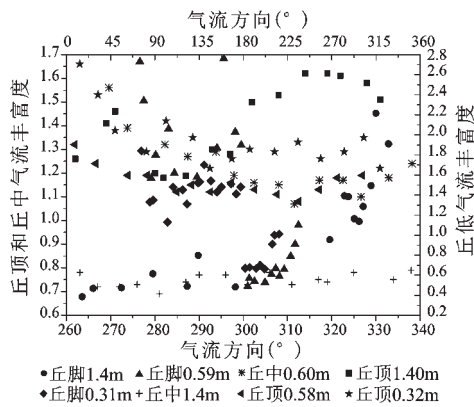


图4 沙丘表面不同部位气流丰富度与气流方向的关系

Fig.4 The relationship between flow exuberance and air flow direction over dune surface

气流丰富度不仅随高度变化而变化,气流方向不同,丰富度亦不同。沙丘表面相同的高度,气流丰富度变化规律相似,如沙丘脊线 0.58 m 和中部 0.60 m 高度,气流丰富度随气流方向先降低后增加,在气流方向为 310° 左右达到最小值,这说明气流方向与沙丘脊线垂直时,气流对雷诺应力的产生作用最小,此时,沙粒起动和风沙流运动最明显。沙丘脊线 0.32 m 高度,气流丰富度随气流方向表现为波浪变化,气流丰富度最大值所对应的气流角度在 260° 左右,在 260°~290° 之间,气流丰富度明显降低,但在 290°~330° 之间,成波浪状。沙丘中部 1.38 m 高度,气流丰富度小于 1 且成波浪状。气流丰富度波浪状的特征,体现了气流方向对雷诺应力的贡献差异,从而导致沙丘表面不同位置风沙流运动过程的差异。

在沙丘背风坡,当气流属于反向和偏向北时,气流丰富度大于 1,而气流为偏向气流且偏向西时气流丰富度小于 1,此时,反向气流抑制了雷诺应力的产生,造成沙丘表面沙粒的运动能力减小,而偏向西的偏向气流极有利于雷诺应力的产生,有利于沙丘表面沙粒的运动。背风坡坡脚 1.4 m 高度,当气流属于反向和偏向北时,气流丰富度随气流方向体现为波浪状变化,在 45° 左右达到最小值;当气流为偏向气流且偏向西时,气流丰富度与气流方向亦为波浪状变化,在 225° 左右达到最小值。在背风坡坡脚 0.59 m,当气流属于反向和偏向北时,气流丰富度随气流方向亦表现为波浪状,最大气流丰富度对应的气流方向为 70° 和 160° 左右;当气流为偏向气流且偏向西时,气流丰富度体现为连续增加。在

背风坡坡脚 0.31 m,当气流属于反向和偏向北时,气流丰富度随气流方向表现为波浪状,最大气流丰富度对应的气流方向为 70° 左右;当气流为偏向气流且偏向西时,湍流强度体现为连续增加。

3 结 论

1) 沙丘形态控制沙丘表面气流特征,沙丘迎风坡中部和脊线的气流为偏向流,而背风坡气流比较复杂,包括未偏向流、偏向流和反向流,同时,背风坡气流分离泡长度、高度亦受气流方向的影响。背风坡气流分离与脊线气流方向密切相关,气流方向在 290°~330° (与主风向夹角 -25°~15°) 时,近地层 0.31 m 高度处于分离泡的下层,气流为反向流;在 0.59 m 高度,气流方向 315°~330° 范围时,近地层 0.59 m 高度处于分离泡下层,气流为反向流。

2) 沙丘表面气流湍流属性,如湍流强度、水平雷诺应力和气流丰富度与气流方向密切相关。沙丘表面不同位置湍流属性与气流方向的关系不同,沙丘中部和顶部相对简单,但由于背风坡气流包括了反向流、偏向流和未偏向流,所以气流的湍流强度、雷诺应力和气流丰富度要比沙丘中部和顶部复杂。

3) 沙丘表面气流湍流属性与气流方向之间的关系反映了沙丘形态-动力学特征演化过程中,近地层气流-风沙流-沙丘移动之间的复杂性及气流方向在沙丘形成与演化过程中的作用。沙丘脊线的湍流强度、水平雷诺应力和气流丰富度总体大于沙丘中部,这导致沙丘脊线的风沙活动强度比中部强烈。

参考文献:

- [1] Ewing R C, Kocurek G. Aeolian dune-field pattern boundary conditions[J]. *Geomorphology*, 2010, **114** (3): 175-187.
- [2] 韩致文, 缙倩倩, 杜鹤强, 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.
- [3] 王训明, 董治宝, 赵爱国. 简单横向沙丘表面物质组成、气流分布及其在动力学过程中的意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2004, **18** (4): 29-33.
- [4] 周 娜, 张春来, 刘永刚. 雅鲁藏布江米林宽谷段新月形沙丘粒度分异研究[J]. *地理科学*, 2011, **31** (8): 958-963.
- [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.
- [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[J]. *中国科学(D)*, 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,赵爱国,等.库姆塔格沙漠风沙活动特征[J].干旱区地理,2010,33(6):1~9.
- [10] 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.
- [11] 张加琼,张春来,王焕芝.包兰铁路沙坡头段防护体系生物土壤结皮沉积特征及其风沙环境意义[J].地理科学,2013,33(9):1117~1124.
- [12] Zhang Z C,Dong Z B,Zhao A G.Observations of Gobi aeolian transport and wind fetch effect[J].Science China Earth Sciences,2012,55(8):1323-1328.
- [13] Bauer B O,Davidson-Arnott R G D,Walker I J,et al.Wind direction and complex sediment transport response across a beach-dune system[J].Earth Surface Processes and Landforms,2012,37(15):1661-1677.
- [14] 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.
- [15] Sweet M L,Kocurek G.An empirical model of Aeolian dune lee-face airflow[J].Sedimentology,1990,37(6):1023-1038.
- [16] Jackson D W T,Beyers M,Delgado-Fernandez I,et al.Airflow reversal and alternating corkscrew vortices in foredune wake zones during perpendicular and oblique offshore winds[J].Geomorphology,2013,187(1):86-93.
- [17] 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.
- [18] Walker I J,Nickling W G.Simulation and measurement of surface shear stress over isolated and closely spaced transverse dunes in a wind tunnel[J].Earth Surface Processes and Landforms,2003,28(10):1111-1124.
- [19] Wiggs G F S,Weaver C M.Turbulent flow structures and aeolian sediment transport over a barchan sand dune[J].Geophysical Research Letters,2012,39:L05404.
- [20] Yang X P,Scuderi L,Liu T,et al.Formation of the highest sand dunes on Earth[J].Geomorphology,2011,135(1-2):108-116.
- [21] Chapman C A,Walker I J,Hesp P A,et al.Turbulent Reynolds stress and quadrant event activity in wind flow over a coastal foredune[J].Geomorphology,2012,(151-152):1-12.
- [22] Walker I J.Physical and logistical considerations of using ultrasonic anemometers in aeolian sediment transport research[J].Geomorphology,2005,68(1-2):57-76.
- [23] Weaver C M,Wiggs G F S.Field measurements of mean and turbulent airflow over a barchan sand dune[J].Geomorphology,2011,128(1-2):32-41.
- [24] 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.
- [25] Bauer B O,Yi J,Namikas S L,et al.Event detection and conditional averaging in unsteady Aeolian systems[J].Journal of Arid Environmental,1998,39(3):345-375.
- [26] Sterk G,Jacobs A F G,van Boxel J H.The effect of turbulent flow structures on saltation sand transport in the atmospheric boundary layer[J].Earth Surface Processes and Landforms,1998,23(10):877-887.
- [27] Leender J K.Wind forces and related saltation transport[J].Geomorphology,2005,71(3-4):357-372.

Field Observation on the Flow Turbulence Characteristics Over Transverse Dune

ZHANG Zheng-cai, DONG Zhi-bao

(Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China)

Abstract: Dune morphology dynamic is one of the main issues in aeolian geomorphology research. Because of the restriction of measurement technology, the research result on the aeolian geomorphology dynamic is unable to meet the need for dune formation and development at present. Sonic anemometer could measure the high frequency three direction wind velocity simultaneously, and could provide detailed flow information over dune surface. The results indicated that the flow structure at dune ridges and middle part is deflected; however, the flow structure at dune toe is reversal, deflected and undeflected. The flow direction at the ridge is asymmetric for the formation of reversal and deflected flow at the toe. Turbulence intensity, Reynolds stress and flow exuberance changed with flow direction, and has the similar rule at the dune ridge and middle part over dune surface, but it's complicated at dune toe.

Key words: reversal flow; turbulence intensity; Reynolds stress; flow exuberance