

DOI: 10.7652/xjtuxb201307021

小尺度新月形沙丘背风侧流场特性的大涡模拟分析

周晓斯, 王元, 李志强

(西安交通大学流体机械及工程系, 710049, 西安)

摘要: 为了准确获得新月形沙丘背风侧湍流流场流动特性,采用基于 Smagorinsky 的亚格子尺度涡黏模型的大涡模拟(LES)方法,对简化了的实验缩比小尺度沙丘模型绕流气相流场进行了数值研究,模拟了相同来流风速、不同沙丘迎风坡度和高度下背风侧风场的湍流流动模式,获得了背风侧区域地表面摩擦系数分布,比较了回流区长度和湍流强度分布。模拟结果表明:LES 方法能较好地揭示背风侧湍流流场特性;流场重附距离随沙丘迎风坡度和高度的增加而增大;背风侧回流区内湍流强度总体上比回流区外大,回流区内沙丘坡脚位置及重附点位置处湍流强度最大值出现在贴近地表附近,随沙丘高度的增加而增大;回流区中部湍流强度最大值出现在回流区顶部,随沙丘高度的增加先增大后基本不变。

关键词: 实验缩比;背风侧流场;大涡模拟;湍流强度

中图分类号: O359;X169 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)07-0114-06

Large Eddy Simulation of Flow Field Characteristics on Lee of a Small Scale Barchan Dune

ZHOU Xiaosi, WANG Yuan, LI Zhiqiang

(Department of Fluid Machinery and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The large eddy simulation(LES)on the gas flow field over a simplified experimental reduced-scale barchan dune model was performed with the Smagorinsky SGS model to obtain the turbulent flow field characteristics on lee of the barchan dune more accurately. The wind field turbulent flow modes on the lee with various stoss slope and height of the dune were studied at the same wind velocity. The surface friction coefficient distribution in the lee region was obtained. The length of the recirculation zone and turbulent intensity distribution were discussed. The results show that LES can reveal the lee turbulent flow field characteristics better. The flow field re-attachment distance increases with the stoss slope and the dune height. The turbulence intensity inside the recirculation zone is generally greater than that outside the recirculation zone. The maximum turbulence intensity at the location of lee toe and re-attachment occurs near the surface and increases with the dune height. The maximum turbulence intensity at the location of the central recirculation zone appears at the top of the recirculation zone and increases first and then remains unchanged with an increase in the dune height.

Keywords: experimental reduced-scale; lee-side flow field; large eddy simulation; turbulence intensity

收稿日期: 2012-07-30。 作者简介: 周晓斯(1984—),男,博士生;王元(通信作者),男,教授,博士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10972176, 11272252)

网络出版时间: 2013-04-23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20130423.1659.005.html>

典型的横向新月形沙丘是单一风向下发育出的简单沙丘形态。来流风场在新月形沙丘背风侧发生分离,沿下风向至上而下形成反向气流(回流涡旋)区、气流重附区及重附区后的向下恢复流动区^[1-2]。新月形沙丘风场和演化模式的野外观测研究基于的是真实的沙丘尺度,而目前的风洞模拟无法复现真实时空尺度下的沙丘风场和演化规律,因此开展实验室缩比小尺度沙丘模型风洞模拟应运而生^[3-7]。

对于小尺度沙丘绕流流动数值模拟,Parsons 等依托于风洞实验数据,基于 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型,对单个横向沙丘表面流场特性进行了二维数值模拟,揭示了风场沿沙丘面下风向的停滞、加速和背风侧的流动分离的过程^[8-9];Schatz 等基于 FLUENT 软件,采用 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型,研究了沙丘背风侧回流区长度与沙丘形态的关系^[10];江丽娟等基于 FLUENT 软件,采用 $k-\epsilon$ 湍流模型对真实尺度新月形沙丘表面开展了全流场数值计算^[11];蒋红等采用相位多普勒粒子分析仪(PDPA)并结合数值模拟,测量并计算了坡面近地表风场风速,模拟复现了背风坡回流涡区模式^[12]。

以上沙丘背风侧流场的研究大多集中于不同沙丘形态下的分离区长度的比较与讨论,为了更加完善地揭示沙丘背风侧流场湍流流动特性,本文基于大涡模拟(LES),采用自编程序,对简化了的实验缩比小尺度新月形沙丘模型背风侧典型的分离流动区域进行了数值计算,分析了背风侧气流分离、重附及向下游恢复流动的流场特性,分析了分离流动区形态及湍流强度的变化规律。

1 数学模型

基于 LES,对气相 Navier-Stokes 方程进行了滤波,对滤波后大尺度涡进行了直接求解,对滤波后小尺度涡引入了亚格子模型。LES 控制方程如下。

连续性方程

$$\partial \bar{u}_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

动量方程

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = \\ & - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \end{aligned} \quad (2)$$

式中:上标“-”为变量的大尺度分量; τ_{ij} 为亚格子应力,本文对亚格子应力的模化基于了涡黏性假设,其表达式为

$$\tau_{ij} = 2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (3)$$

其中: μ_t 为亚格子涡黏系数; $\bar{S}_{ij}$ 为亚格子尺度的应变率张量。基于 Smagorinsky 的亚格子涡黏模型为

$$\mu_t = \rho(C_s D \Delta)^2 |\bar{S}| \quad (4)$$

$$|\bar{S}| = (2\bar{S}_{ij}\bar{S}_{ij})^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

式中: Δ 为滤波尺度; D 为引入修正函数壁面模型的近壁衰减函数^[13], $D = 1 - \exp[-(\frac{y^+}{25})^3]$, $y^+ = yu_* / \nu$; C_s 为 Smagorinsky 常数,计算时 $C_s = 0.12$ 。

2 计算方法及条件

2.1 计算模型

计算模型采用文献[9]模拟实验模型 1 的固定沙丘模型。由于单一风向下形成的横向沙丘(新月形沙丘)沿展向的剖面均呈现与沙丘剖面相似的几何结构,沙丘风场流动主要在流向方向和垂向方向上。相比于流向和垂向的速度分量,展向的速度分量变化很小,所以模拟时忽略展向的速度分量。

二维小尺度新月形沙丘模型采用简化了的三角形中剖面。沙丘高度 $H = 0.08$ m,沙丘总长度 $L = 0.688$ m,沙丘迎风坡底边长度 $L_s = 0.56$ m,背风侧底边长度 $L_l = 0.128$ m,迎风坡倾斜角度 $\theta_s = 8.13^\circ$,背风侧倾斜角度 $\theta_l = 32^\circ$ 。整个计算区域为 $9.8 \text{ m} \times 0.76 \text{ m}$,网格数目为 980×127 。图 1 为沙丘流场计算区域。

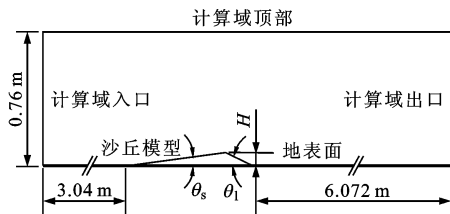


图 1 沙丘流场计算区域

2.2 计算条件

计算域入口采用符合对数律分布的风速廓线速度剖面作为入流边界;计算域出口采用对流边界条件作为出流面,该条件适用于非稳态计算^[14];计算域下壁面即地表面,包括沙丘模型表面,均采用无滑移边界条件;计算域顶部采用对称边界条件。近壁面区域流场通过施加壁面函数法进行处理。整个沙丘的剖面作为固体壁面,整个沙丘表面采用阶梯逼近的方法来处理。

LES 数值计算基于有限体积法(FVM),采用交错网格,通过 SIMPLE 算法来耦合速度场和压力

场。控制方程对流项采用隐定性可保证的二阶差分格式进行离散^[15],扩散项采用二阶精度的中心差分格式进行离散。非稳态时间项采用全隐格式,计算时间步长 $\Delta t = 2.5 \times 10^{-5}$ s。计算中以对数律速度剖面初始化流场,并以 $15\%U_0$ (U_0 为计算域顶部流向时均速度)的随机脉动量来叠加平均速度剖面,同时对初始场增加扰动,从而完成流场从层流向湍流的转捩。压力初值为 0 Pa。

3 计算结果与分析

流经沙丘表面的单一风向风场的风速分布采用对数律分布: $u = \frac{u_*}{k} \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$, 其中 u_* 为摩阻风速, $u_* = (\tau_0/\rho)^{\frac{1}{2}}$, τ_0 为地表剪切应力。LES 处理近壁面流场时 τ_0 采用 Werner-Wengle 模型^[16] 计算,即

$$\begin{aligned} |\bar{u}_p| &\leq \frac{\mu}{2\rho\Delta y} A^{\frac{2}{1-B}} \\ |\tau_0| &= \frac{2\mu}{\Delta y} |\bar{u}_p| \\ |\bar{u}_p| &> \frac{\mu}{2\rho\Delta y} A^{\frac{2}{1-B}} \\ |\tau_0| &= \rho \left[\frac{1-B}{2} A^{\frac{1+B}{1-B}} \left(\frac{\mu}{\rho\Delta y} \right)^{1+B} + \right. \\ &\quad \left. \frac{1+B}{A} \left(\frac{\mu}{\rho\Delta y} \right)^B |\bar{u}_p| \right]^{\frac{2}{1+B}} \end{aligned}$$

式中: $\bar{u}_p$ 为近壁面流向瞬时速度; Δy 为近壁面控制容积垂向长度; 常数 $A = 8.30$, $B = 1/7$; ρ 为空气密度; y_0 为动力学粗糙度; k 为卡门常数, $k = 0.40$ 。模拟时风场的环境温度为 25°C , 整个模拟过程中温度保持不变。为便于比较分析, 本文采用与文献[9]相同的来流风速廓线分布, 在距地表高度 $y = 0.25$ m 处, 来流的时均风速 $U_{0.25} = 13$ m/s。

3.1 沙丘背风侧气流重附流场特性

图 2 为沙丘背风侧回流涡旋的 LES 时间历程的统计平均分布。由图 2 可见, 来流通过沙丘迎风坡之后, 在背风侧突扩低压区形成了一个反向的回流涡旋。实际沙丘流场中, 这一反向二次流模式与沙丘携沙运动方向相反, 并在一定程度上阻碍了沙粒向下风向的运动, 形成大量沙粒在背风侧沉积, 所以突扩分离区是影响沙丘形态演变的一个重要因素。图 3 为 LES 预报出的沙丘背风侧沿水平下风向距离沙丘顶部位置 0.128 m 处, 即背风坡脚位置处, 流向的时均速度随垂向高度的变化。与文献[9]模拟实验 1 数据的对比, 结果显示本文模拟是合理的。

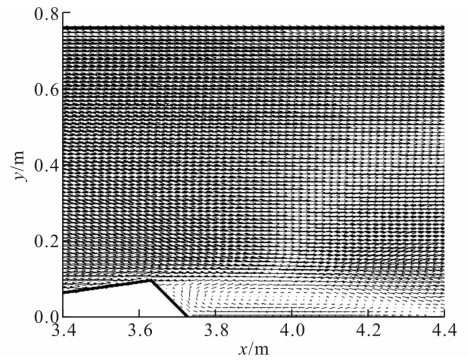


图 2 沙丘背风侧回流涡旋的 LES 时间历程的统计平均分布

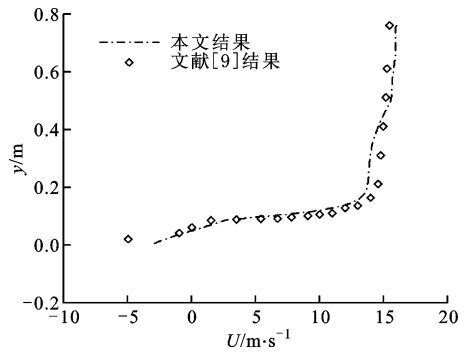


图 3 流向的时均流速与文献[9]模拟实验 1 数据对比

背风侧区域地表面摩擦系数 c_f 可反映风场流经沙丘后, 过突扩回流区并重附及向下风向发展时的情况, $c_f = \tau_0 / (\frac{1}{2} \rho U_0^2)$, 实质与 τ_0 有关, 如图 4 所示。由图 4 可见, 回流涡旋区中 c_f 在距离背风侧坡脚很短距离范围内首先沿下游急剧增大, 随后逐渐减小, 直至 c_f 降到最低, 接近于 0, 此处即为回流区域的重附点位置 $x = 4.39$ m。LES 预报出的气流在背风侧的重附距离为 0.768 m, 即 $9.60H$ 。对于重附距离(回流区长度), 江丽娟等计算得到的结果是

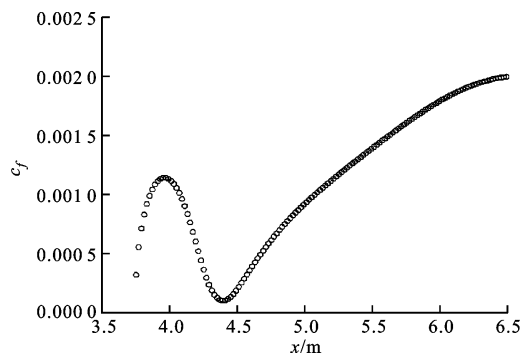


图 4 $H = 0.08$ m 时沙丘背风侧 c_f 分布

在 $2H\sim 8H$ 之间^[11],文献[9]模拟实验 1 得到的重附距离为 $9.13H$ ^[9],通过对比可知,本文 LES 预报出的重附距离与文献[9]采用 $k-\epsilon$ RNG 湍流模型的计算结果比较接近。过重附点之后, c_f 沿下游逐渐增大,表明边界层速度逐渐恢复。

图 5 为 LES 预报出的沙丘背风侧流向和垂向的时均速度场分布。由图 5 可见,沙丘背风侧流场的流向和垂向的时均速度的分布模式是完全不同的,流向时均速度的变化范围比垂向的时均速度大得多。流向的时均速度在突扩低压区减小,同时沿垂向高度的流向时均速度出现明显分层。背风侧回流区流向的时均速度的最大值为来流平均风速的 38%,比文献[6]的风洞实验结果大,是采用的沙丘模型几何形态不同所致。回流区最大高度为 $1.125H$ 左右,与文献[6]的风洞实验结果相同,表明 LES 预报出的回流涡旋模式是正确的。

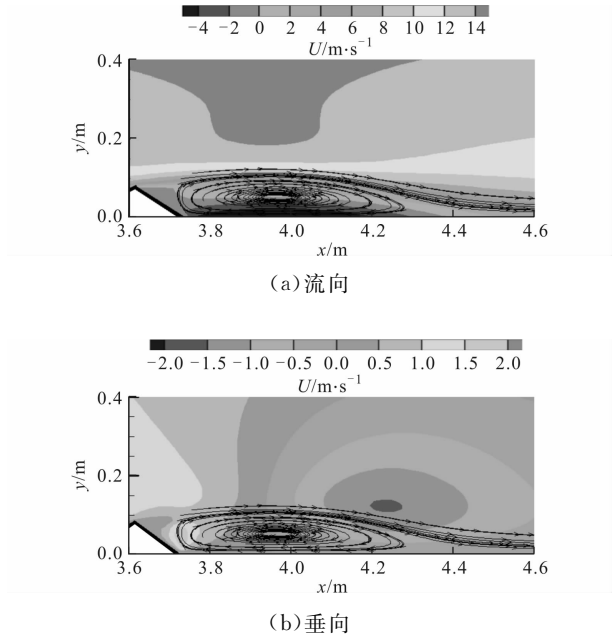


图 5 沙丘背风侧流向和垂向时均速度场分布

3.2 沙丘形态对背风侧区域流场的影响

3.2.1 H 对背风侧重附距离的影响 文献[17]指出,新月形沙丘在迎风坡面变化平缓,迎风坡角 θ_s 介于 $5^\circ\sim 20^\circ$ 之间,而背风坡形成陡峭的滑落面,背风坡角 θ_l 介于 $28^\circ\sim 32^\circ$ 之间。真实沙丘中迎风坡倾角变化范围较宽,而背风坡倾角变化范围较窄,基本等于沙丘沙粒休止角。为了准确复现真实的沙丘流场,本文在图 1 基本缩比模型的基础上,不改变 L_s ,固定 θ_l ,通过改变 H 继而改变 θ_s ,来研究相同来流下沙丘迎风坡度及高度对背风侧湍流流场的影响。表 1 为采用不同形态沙丘的模拟几何结构。

表 1 沙丘的模拟几何结构

H/m	$\theta_s/(\text{^\circ})$	L_s/m	$\theta_l/(\text{^\circ})$	L_l/m
0.04	4.09	0.56	32	0.064
0.08	8.13	0.56	32	0.128
0.12	12.10	0.56	32	0.192
0.16	15.95	0.56	32	0.256
0.20	19.92	0.56	32	0.320

不同 H 下沙丘背风侧区 c_f 的分布如图 6 所示。 c_f 升高后重新降到低点,低点对应着流动重附点。由图 6 可见,背风侧流动重附距离随 H 增加而增大。 H 分别为 0.04、0.08、0.12、0.16、0.20 m 时,图中重附点位置分别标记为①、②、③、④、⑤,计算得到的重附距离分别为 $6.10H$ 、 $9.60H$ 、 $13.43H$ 、 $15.41H$ 、 $16.15H$ 。本文通过 LES 预报出的结果表明,当 $\theta_s>15^\circ$ 时,重附距离仍随 H 的增加而增大,这与文献[11]的结论一致。综上所述,沙丘形态的变化对二次流形态具有重要影响,对于形态变化对重附距离的影响规律,不同研究者得出的结论不尽相同。就本文计算结果而言,相比迎风坡度的变化, H 的变化对重附距离的影响更大。

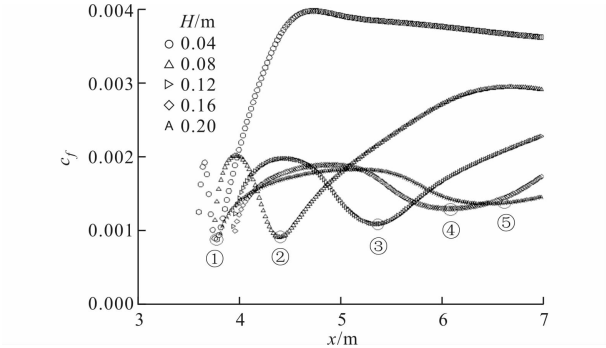


图 6 不同 H 下背风侧区 c_f 的分布

3.2.2 H 对背风侧湍流强度的影响 基于本文 LES,湍流强度计算采用如下公式^[18]

$$T_u = (\overline{u'^2})^{1/2}/U_{0.25} \tag{7}$$

式中: u' 为流向瞬时速度脉动值。

由前述计算可知, $H=0.08$ m 时,重附距离为 $9.60H$,现以 $H=0.08$ m 沙丘作为代表,分别取距离沙丘顶部水平距离 x 分别为 $1.6H$ (即沙丘背风侧坡脚)、 $3H$ 、 $6H$ 、 $9H$ 、 $12H$ 的位置,来研究回流区不同位置的湍流强度变化。

图 7 为 $H=0.08$ m 时背风侧回流区湍流强度的变化。由图 7 可见:贴近地表面风场的湍流强度均比较高层风场的湍流强度大;随着回流区向下游

充分发展,回流区湍流强度增大; x 为 $6H$ (回流区中部位置)时,湍流强度最大值不在贴地表面,而在回流区顶部附近;当流动继续向下游发展,过了重附点后的 x 为 $12H$ 时,湍流强度最大值再次出现在贴地表面,但强度有所减小。这表明回流区中湍流流场由上游到下游得到充分发展,湍流强度逐渐增强,湍流强度大小分布不均,回流涡旋区表现出复杂的流场特性。重附点下游,边界层流场逐渐恢复,贴地表面附近湍流强度下降。

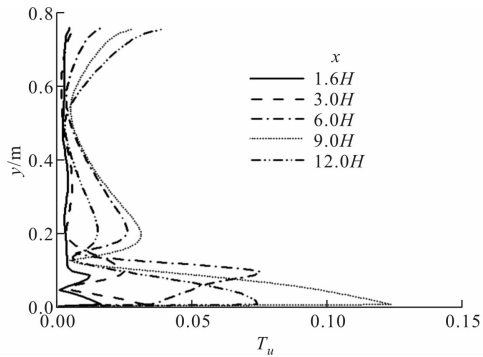


图7 $H=0.08$ m时沙丘回流区湍流强度变化

图8为不同 H 下背风坡脚处湍流强度沿垂向高度的变化。由图8可见,不同 H 下背风侧回流区内湍流强度均处于高值状态,回流区外维持在低值状态。随着 H 的增加,回流区中湍流强度增强,在贴地表面附近, $H=0.20$ m时沙丘湍流强度最大, $H=0.04$ m时沙丘湍流强度最小,最大值比最小值高 3.2% 。

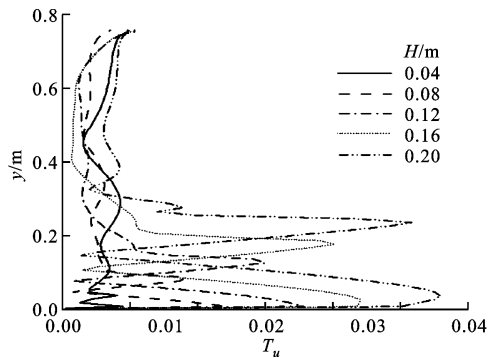


图8 不同 H 下背风侧坡脚湍流强度对比

图9为不同 H 下距离沙丘顶部水平距离为 0.5 倍重附距离位置处的湍流强度分布。由图9可见:不同的 H ,回流区中部湍流强度沿垂向分布与背风侧坡脚湍流强度沿垂向分布(见图8)有所不同;随着 H 的增加,回流区中部湍流强度最大值逐渐增大,当 $H>0.16$ m时,该最大值不再增加;不同 H 下,回流区中部湍流强度最大值均出现在回流区顶

部,回流区外沿垂向向上很小范围内,湍流强度急剧减小。

图10为不同 H 下气流重附点位置的湍流强度分布。由图10可见,在重附点位置,贴地表面湍流强度随 H 的增加而增大,湍流强度值均大于 5% 。这是由于回流区下游湍流流动得到了充分发展,继而在重附点位置表现出高值状态。

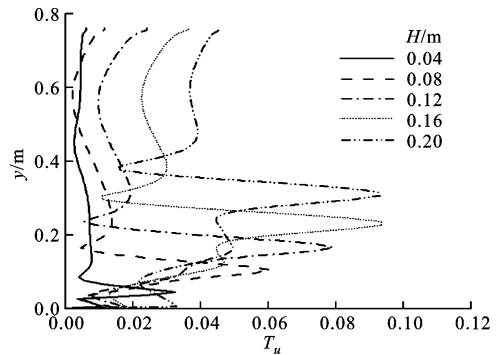


图9 不同 H 下背风侧 0.5 倍重附距离位置处的湍流强度分布

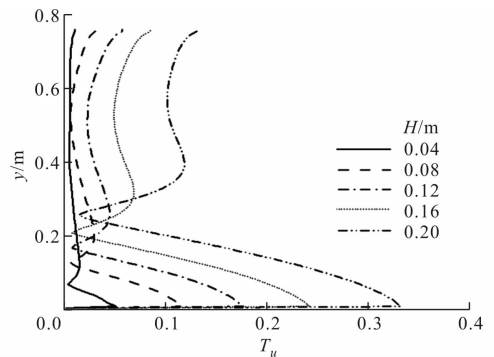


图10 不同 H 背风侧重附点位置的湍流强度分布

4 结论

针对实验缩比小尺度新月形沙丘背风侧典型分离流动区开展了二维LES模拟,计算了沙丘背风侧重附距离,给出了背风侧沿下游方向的地表面摩擦系数的分布,比较了不同迎风坡度、不同沙丘高度下,背风侧重附距离及不同位置处湍流强度的变化,结论如下。

(1)由LES得到了沙丘背风侧流场的反向涡旋模式,由它预报出的速度剖面 and 重附距离与文献[9]的实验结果比较接近。

(2)背风侧流场重附距离随沙丘高度的增加而增大,在沙丘迎风坡度和沙丘高度同时增加的情况下,沙丘高度的变化对重附距离的影响更大。沙丘

的形态因素(迎风坡度、高度等)对重附距离的影响规律尚无唯一定论,需进一步研究。

(3)通过不同沙丘高度下背风侧流场湍流强度对比表明:回流涡旋区表现出复杂的流场特性,背风侧回流区内的湍流强度总体上比回流区外大得多。随着沙丘高度的增加,回流区内背风侧坡脚位置及重附点位置的湍流强度最大值增大,且均出现在贴近地表附近,重附点位置因流动而充分发展,其湍流强度变化幅值要大于坡脚位置,且为高值状态。回流区中部湍流强度最大值出现在回流区顶部,随着沙丘高度的增加,湍流强度最大值先增大,之后基本不变。

(4)简化了的二维LES的计算结果对于揭示沙丘风场规律及工程应用具有一定的指导意义。为获得更为准确、丰富的沙丘风场特性,有必要开展复杂三维沙丘形态下的数值计算。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] WALKER I J. Secondary airflow and sediment transport in the lee of a reversing dune [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24: 437-448.
- [3] 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: 1111-1124.
- [4] 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(1/2/3): 29-46.
- [5] 钱广强,董治宝. 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.
QIAN Guangqiang, DONG Zhibao. Wind tunnel simulation on flow reattachment on lee of transverse dunes [J]. *Journal of Desert Research*, 2008, 28(1): 16-20.
- [6] QIAN Guangqiang, DONG Zhibao. Variations of horizontal and vertical velocities over two-dimensional transverse dunes: a wind tunnel simulation of the effect of windward slope [J]. *Journal of Arid Environments*, 2009, 73: 1109-1116.
- [7] DONG Zhibao, QIAN Guangqiang. Turbulence fields in the lee of two-dimensional transverse dunes simulated in a wind tunnel [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34: 204-216.
- [8] PARSONS D R, WIGGS G F S. Numerical modelling of airflow over an idealised transverse dune [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19: 153-162.
- [9] PARSONS D R, WALKER I J. Numerical modelling of flow structures over idealized transverse aeolian dunes of varying geometry [J]. *Geomorphology*, 2004, 59: 149-164.
- [10] SCHATZ V, HERRMANN H J. Flow separation in the lee side of transverse dunes: a numerical investigation [J]. *Geomorphology*, 2006, 81: 207-216.
- [11] 江丽娟,马高生. 新月形沙丘表面流场的数值模拟 [J]. *兰州大学学报*, 2010, 46(1): 48-52.
JIANG Lijuan, MA Gaosheng. Numerical modeling of flow over an isolated barchan dune [J]. *Journal of Lanzhou University*, 2010, 46(1): 48-52.
- [12] 蒋红,佟鼎,黄宁. 坡面地表下的风场的风洞实验与数值模拟 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(3): 626-631.
JIANG Hong, TONG Ding, HUANG Ning. Numerical simulation and wind tunnel experiment of wind field over slope surface [J]. *Journal of Desert Research*, 2011, 31(3): 626-631.
- [13] PIOMELLI U, BALARAS E. Wall-layer models for large eddy simulations [J]. *Annu Rev Fluid Mech*, 2002, 34: 349-374.
- [14] 陶文铨. 计算传热学的近代进展 [M]. 北京: 科学出版社, 2000: 246.
- [15] LI Z Y, TAO W Q. A new stability-guaranteed second order difference scheme [J]. *Numerical Heat Transfer: Part B*, 2002, 42(4): 349-365.
- [16] ORELLANO A, WENGLE H. Numerical simulation (DNS and LES) of manipulated turbulent boundary layer flow over a surface-mounted fence [J]. *European Journal of Mechanics B: Fluids*, 2000, 19: 765-788.
- [17] 凌裕泉,吴正. 新月形沙丘形态的模拟实验研究 [J]. *地理科学*, 1998, 18(1): 88-93.
LING Yuquan, WU Zheng. Simulated study on barchan dune forms [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(1): 88-93.
- [18] 陈懋章. 粘性流体动力学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 244.

(编辑 苗凌)