

沙漠地貌演化过程的湍流大涡模拟研究

吴锤结^{*1}, 陈 剑²

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室 工程力学系, 大连 116024;

2. 解放军理工大学 理学院流体力学研究中心, 南京 211101)

摘 要:采用大涡模拟和混合粒径群体沙粒运动算法结合内置边界方法来模拟沙波纹与沙丘的演化和发展,在平坦沙区形成沙波纹的同时,在沙丘上同样也出现了沙波纹的结构,即沙波纹的发展出现了多尺度现象。此外,还分析了粒径对沙波纹与沙丘自身形态演化发展的影响,以及沙丘对平坦沙区沙波纹形成发展的作用。

关键词:沙波纹;沙丘;大涡模拟;混合粒径;内置边界;多尺度

1 引 言

风成沙波纹的波峰横向连续且脊线长度大于波长,其横截面具有明显的不对称性:一般迎风坡长而缓,背风坡短而陡^[1];位于波峰的沙粒较粗,波谷的沙粒较细。因对沙波纹的研究有助于更准确地认识和预测风沙运动^[2],吸引了众多研究者的关注。

2 数值方法

2.1 风场数值方法

采用高精度拟谱法求解三维不可压缩 Navier-Stokes 方程和连续性方程:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_j} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} \bar{u}_i \bar{u}_j = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}_\tau} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x^2} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \end{cases} \quad (1)$$

式中 $\tau_{ij} = R_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} R_{kk}$, $R_{ij} = \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \bar{u}_j \text{Re}_\tau$ 是基于壁面摩擦速度的雷诺数, $\frac{1}{3} \delta_{ij} R_{kk}$ 为各向同性的湍流应力, F_i 为跃移沙粒对单位体积风的阻力,即内置边界方法中沙粒对流场的反作用。设单个沙粒只对它在三维网格周边八个结点有反作用。

计算区域为 $2\pi(\text{m}) \times \frac{4}{3}\pi(\text{m}) \times 1(\text{m})$, 采用正交网格,网格数为 $64 \times 64 \times 64$,流向和展向为均匀

网格,垂向为下密上疏的非均匀称网格。流向和展向为周期边条,底部为无滑移边条,顶部为滑移边条。

2.2 颗粒跃移模型

在计算中,先求解基于小球精确解的颗粒运动方程以得到大规模沙粒的跃移运动,然后考虑流场与沙粒的双向耦合产生沙波纹,见文献[3]。单个沙粒的运动控制方程为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -F_{dx} + F_{mx}, m \frac{d^2 y}{dt^2} = -F_{dy} \quad (2,3)$$

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = -mg - F_{dz} + F_{mz} + F_{ez} + F_l \quad (4)$$

式中 F_{dx} , F_{dy} 和 F_{dz} 为沙粒受到的拖拽力, F_{mx} 和 F_{mz} 为 Magnus 力, F_{ez} 为静电力, F_l 为沙粒所受升力, mg 为沙粒重力。

采用四阶龙格-库塔法对以上三个常微分方程进行两次求解得到单个沙粒的跃移轨迹,进而得到大规模沙粒的跃移运动轨迹。跃移的边界条件是: x 方向为周期边界条件, y 方向为周期边界条件, z 方向顶部为连续出流条件,底部为无滑移边界。

2.3 颗粒蠕移模型

造成沙粒产生蠕移运动的原因主要是风场的迎面压力和跃移沙粒的冲击,而沙粒的蠕移主要是由风的迎面压力造成的,因此

$$u_{creep} = u, v_{creep} = v, w_{creep} = 0 \quad (5)$$

式中 u 和 v 是蠕移沙粒所在位置的风速。经调试得到地表沙粒蠕移速度方程为

$$\text{迎风坡: } u_{i,j}^c = u_{i-1,j,k}, v_{i,j}^c = v_{i-1,j,k}, w_{i,j}^c = 0 \quad (6)$$

$$\text{背风坡: } u_{i,j}^c = u_{i,j,k+1}, v_{i,j}^c = v_{i,j,k+1}, w_{i,j}^c = 0 \quad (7)$$

式中 $u_{i,j}^c$, $v_{i,j}^c$ 和 $w_{i,j}^c$ 为沙粒蠕移速度,上标表示蠕

收稿日期:2008-08-18;修改稿收到日期:2008-10-13.

基金项目:国家自然科学基金重点(10532040)资助项目.

作者简介:吴锤结*(1955-),男,教授

(E-mail:cjwudut@dlut.edu.cn).

移,下标表示网格。蠕移边界条件为流向和展向均为周期边界,垂向无蠕移。

2.4 颗粒碰撞模型

设任意两沙粒的质心距离为 r ,当 $r \leq r_0$ 时,两沙粒发生碰撞,碰撞后两沙粒的位置不变;但是速度与原来相反,碰撞后两沙粒均沿各自相反方向运动。

3 计算结果

3.1 粒径对沙波纹发展的影响

设初始沙面的高度为 $h_0(x,y)$,沙面高度变化为 $h'(x,y)$,则沙面实时高度 $h(x,y) = h_0(x,y) + h'(x,y)$ 。

3.1.1 沙波纹形态的比较

取取向中央 xwz 剖面为研究对象,如图 1($t=10\text{ s}$)所示。图中带三角形的线表示单一粒径时所得到的沙波纹,而带小方框的线则表示混合粒径时所得到的沙波纹,可见:混合粒径下所形成沙波纹波长较长,沙波纹粒径越小,所形成沙波纹波长越长;单一粒径时的波高要明显高于混合粒径时的情况。

3.1.2 沙波纹波长、波高的比较

图 2(a) 是波长对比,带圆圈的线表示单一粒径时沙波纹波长的演变趋势,带方框的线表示混合粒径时沙波纹波长的演变趋势。两种情形下沙波纹波长波高比分别为 305.1 和 523.3,可见混合粒径时波长波高比要比单一粒径时大得多,说明单一粒径稳定波高要高于混合粒径,即粒径越小,沙波纹波高越小。这与兹纳门斯基根据实验提出的沙粒中粗沙含量越多,粒径越大,沙波纹波长越小的观点完全一致。

3.2 预加单个沙丘地形的演化

3.2.1 沙丘地形边界

预加的沙丘曲面由两个椭球面切成:

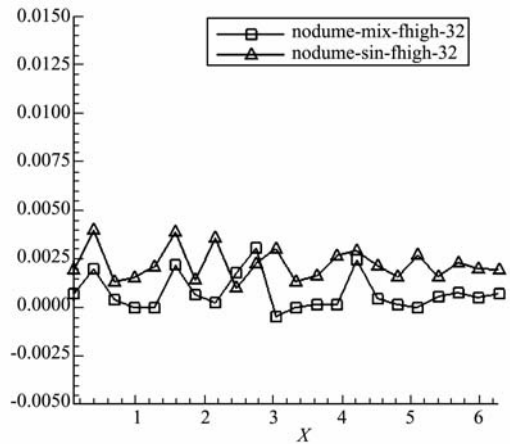
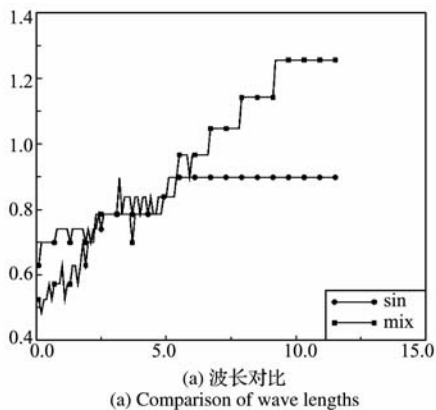


图 1 单一粒径与混合粒径沙波纹剖面图
Fig. 1 The cross sections of sand ripples with single and mixed sand sizes

$$\begin{cases} \frac{(x-\pi)^2}{(3\pi/8)^2} + \frac{(y-2\pi/3)^2}{(\pi/4)^2} + \frac{z^2}{0.3^2} = 1 \\ \frac{(x-3\pi/2)^2}{(3\pi/8)^2} + \frac{(y-2\pi/3)^2}{(\pi/2)^2} + \frac{(z-0.3)^2}{0.33^2} = 1 \end{cases} \quad (10)$$

3.2.2 三维沙丘地形演化

图 3 所示为混合粒径时三维沙丘地形的演化。 $t=8.5\text{ s}$ 和 $t=9.9\text{ s}$ 时,平坦沙区的沙波纹十分明显,沙丘自身形态发生明显的变化。

3.2.3 沙丘自身的演化

图 4 所示为左、右图分别为单一和混合粒径时 $t=10\text{ s}$ 时刻沙丘的形态,图中带方框的曲线表示展向第 32 层网格处初始时的沙丘形状,带三角形的曲线是稳定沙波纹形成后的沙丘形态剖面,而带菱形方框的曲线代表后者与前者的差值。可见,当平坦沙区沙波纹稳定后,沙丘迎风区底部出现了凹陷,而顶部高度增大,出现了明显的沙粒堆积。

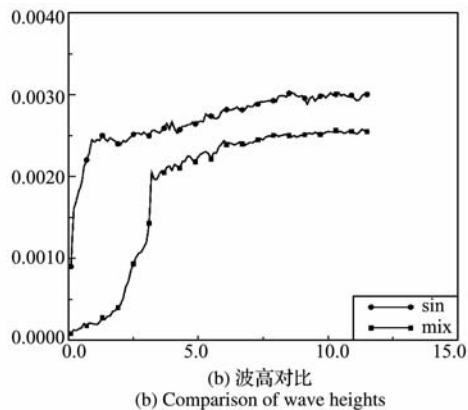


图 2 两粒径下沙波纹波长、波高的对比
Fig. 2 Comparison of wave lengths and wave heights of sand ripples with two different sand sizes

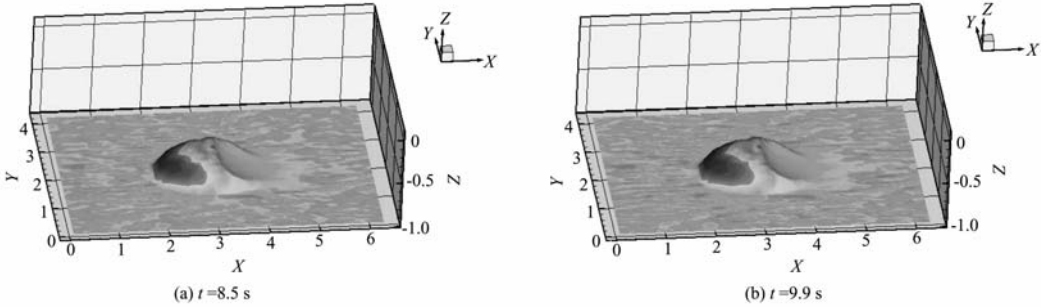


图 3 混合粒径三维沙丘地形的深化过程

Fig. 3 The shape evolution process of a three-dimensional sand dune with mixed sand sizes

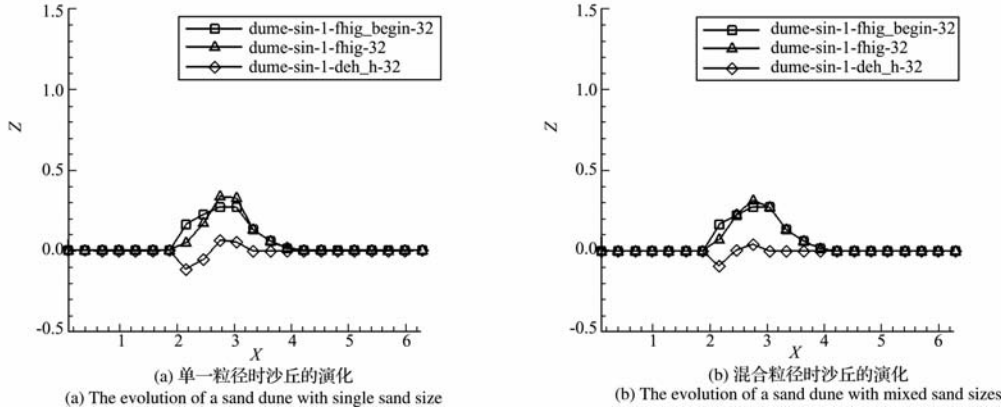


图 4 单个沙丘自身形状的变化

Fig. 4 The shape change of a sand dune

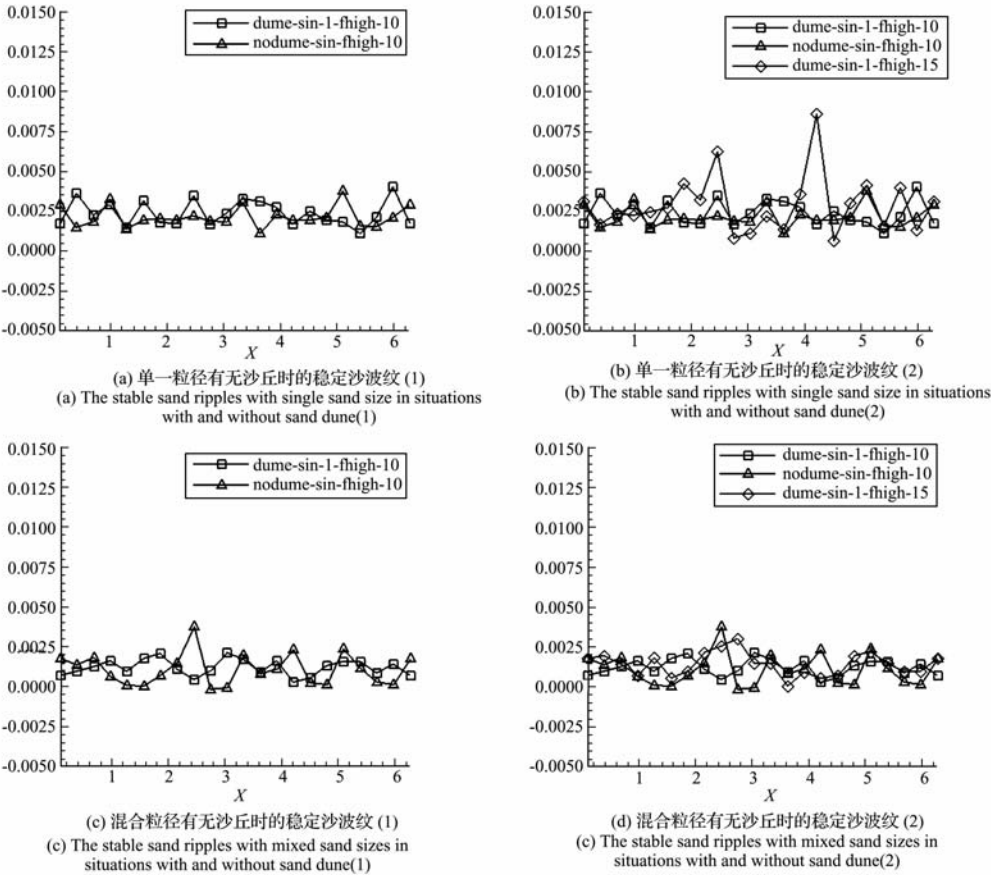


图 5 单个沙丘对沙波纹发展的影响

Fig. 5 The effect of a sand dune to the development of sand ripples

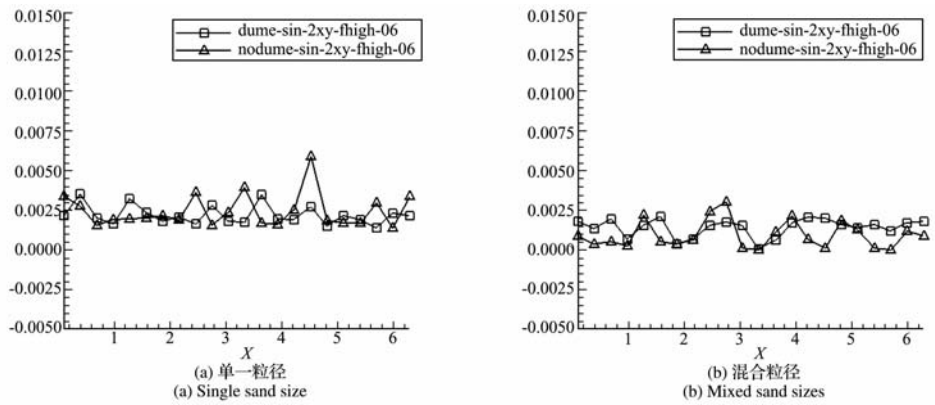


图 6 单一、混合粒径下错位沙丘对沙波纹发展的影响

Fig. 6 The effects of staggered sand dunes to the development of sand ripples in situations of single and mixed sand sizes

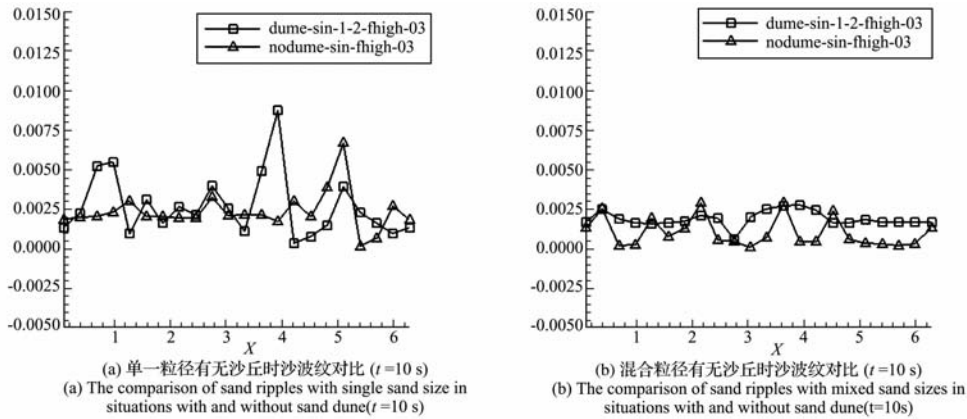


图 7 有无“正三角”型沙丘形成沙波纹对比($t = 10$ s)

Fig. 7 The comparison of sand ripples with and without sand dunes arranged in regular triangle form($t = 10$ s)

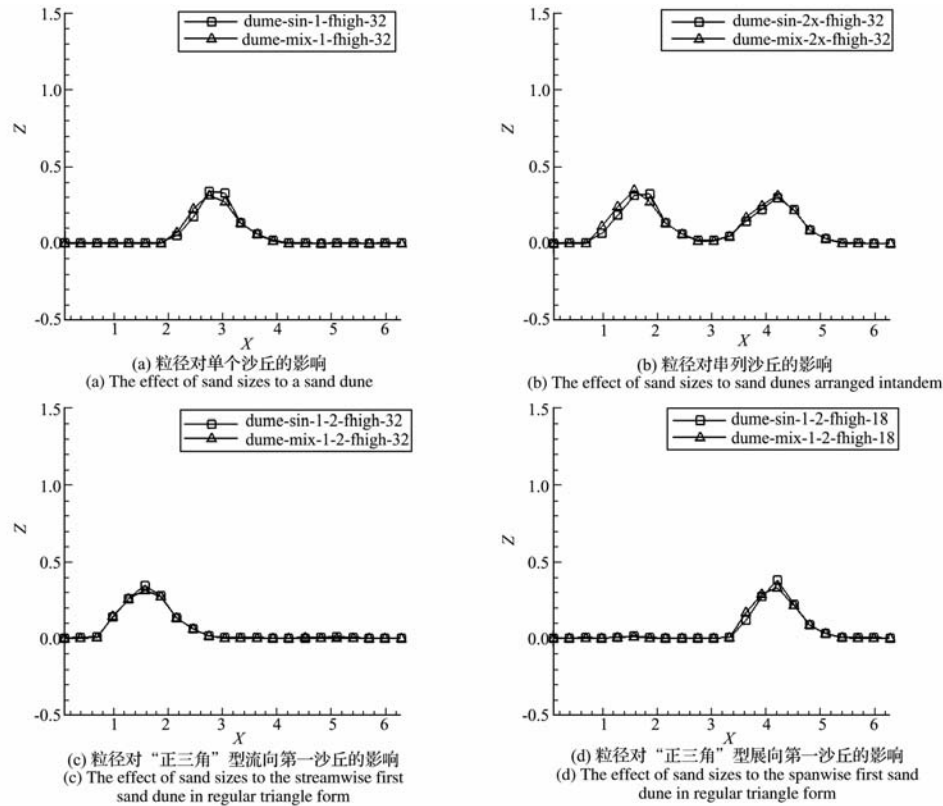


图 8 粒径对沙丘的影响

Fig. 8 The effects of sand sizes to sand dunes

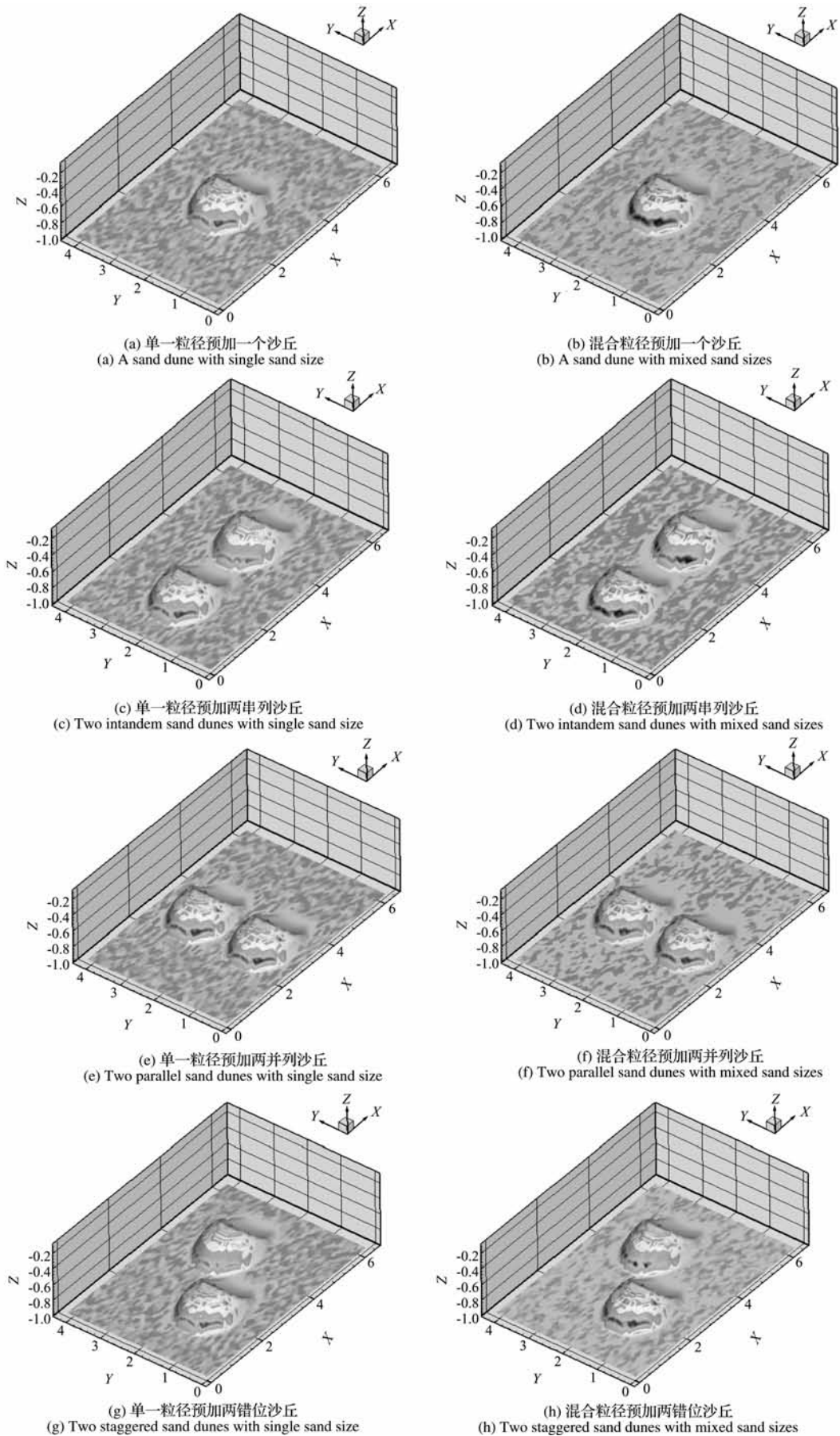


图 9 预加 1 ~ 2 个沙丘时沙波纹的多尺度现象

Fig. 9 The multiscale phenomena of sand ripples with one or two sand dunes

3.3 沙丘对沙波纹发展的影响

3.3.1 预加单个沙丘对沙波纹发展的影响

取取向第 10 层网格处地形剖面图为研究对象,如图 5 所示,(a) 和(b) 为单一粒径情形下沙波纹剖面图,(c) 和(d) 为混合粒径情形下沙波纹剖面图。可见:预加沙丘地形形成的稳定沙波纹数与不预加沙丘时的大致相同,但其波高高些;离沙丘地形越近,沙波纹波数变少,沙波纹波高加大,说明距离沙丘越近,沙波纹发展受沙丘影响越大。

3.3.2 预加两个沙丘对沙波纹发展的影响

取取向第 6 层网格处的沙波纹剖面研究。图 6(a,b) 分别为单一粒径和混合粒径有无错位沙丘在 $t = 10\text{ s}$ 时展向第 6 层网格处沙波纹剖面,其中三角形和方框表示不预加和预加错位沙丘时沙波纹的剖面。可见,单一粒径预加错位沙丘后的沙波纹波数减少,而平均波高则大于不预加错位沙丘时的。

3.3.3 “正三角”型沙丘对沙波纹的影响

图 7(a) 为单一粒径时有无“正三角”型沙丘在展向第三层网格处的沙波纹剖面曲线,图 7(b) 为混合粒径时有无“正三角”型沙丘在展向第三层网格处的沙波纹剖面曲线。图中方框曲线均代表预加“正三角”型沙丘后 $t = 10\text{ s}$ 时刻的沙波纹剖面,三角形曲线则代表初始面平坦时在 $t = 10\text{ s}$ 时刻所形成的沙波纹。可见:单一粒径时沙波纹的形态较为明显,受“正三角”型沙丘的影响,波数和波高都有所增长,流向后半部波高更高;混合粒径时形成的沙波纹则不明显。

3.4 粒径对沙丘演化的影响

3.4.1 粒径对单个沙丘演化的影响

图 8(a) 和(b) 分别表示粒径对单个和串列沙丘的影响,图 8(c,d) 表示粒径对多个沙丘(正三角型沙丘)的影响,其中带方框和带三角形的曲线分别表示单一粒径和混合粒径在 $t = 10\text{ s}$ 时沙丘展向第 32 层网格处((d) 为展向第 18 层网格处)的剖面。可见:单一粒径时沙丘迎风区所受侵蚀要强于混合粒径时的情形,且沙丘顶部及其下游堆积效应比混合粒径时强,粒径越大,沙丘迎风区侵蚀和沙丘顶部及其下游堆积现象的程度越厉害。

3.5 沙波纹发展的多尺度现象

图 9(a,b) 分别为单一和混合粒径时的情形。平坦沙区和沙丘上的沙波纹尺度不同,这就是沙波纹的多尺度现象。

4 结 论

(1) 单一粒径时的沙波纹波长较小,波高较高;混合粒径时形成的沙波纹波长较长,波高较低;粒径越小,所形成的沙波纹波长越大,波高越小;粒径越大,沙丘迎风区侵蚀和沙丘顶部及其下游堆积越显著。

(2) 预加单个和两个沙丘时,平坦沙区形成的沙波纹波数减少,波长增长,波高增高;且距沙丘越近,这种趋势更加明显。

(3) 预加多个沙丘时,平坦沙区形成的沙波纹波数和波高都有所增加,预加的沙丘地形演化过程中其形态将发生变化;沙丘迎风区出现明显的下陷,沙丘顶部及其下游则出现显著堆积。

(4) 预加沙丘地形后,平坦沙区和沙丘上存在多尺度沙波纹现象。

参考文献(References):

[1] 吴 正,薄天利,谢 莉. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003. (WU Zheng, BO Tian-li, XIE Li. Aeolian Geomorphology and Desertification Engineering[M]. Beijing: Science Press,2003. (in Chinese))

[2] 郑晓静,薄天利,谢 莉. 风成沙波纹的离散粒子追踪法模拟[J]. 中国科学,2007, 37(4): 527-534. (ZHENG Xiao-jing, BO Tian-li, XIE Li. The discrete particle tracing simulation of aeolian sand ripples[J]. Sciences in China,2007,37(4):527-534. (in Chinese))

[3] 吴锤结,王 明,王 亮. 湍流风场中三维风成沙波纹形成过程的大涡模拟研究[J]. 中国科学,2008, 38(6):637-652. (WU Chui-jie, WANG Ming, WANG Liang. Large-eddy simulations of the evolution process of three-dimensional aeolian sand ripples in a turbulent flow field[J]. Sciences in China,2008, 38(6):637-652. (in Chiense)) (下转第 368 页)

plications [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese))

loads[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1990, **136** (2): 323-342.

[10] LIN Y H, TRETHEWEY M W. Finite element analysis of elastic beams subjected to moving dynamic

[11] ZIENKIEWICZ O C. *The Finite Element Method* [M]. Beijing: Science Press, 1985.

Identification of multi-variables in a beam subjected to moving loads via a self-adaptive precise algorithm in time domain

LI Ha-ting*, YANG Hai-tian

(State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Department of Engineering Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A numerical model is presented to identify constitutive parameters for a simply supported beam subjected a moving load. An adaptive precise algorithm in the time domain and FEM are employed to describe the direct problem, and sensitivity analysis can therefore be implemented conveniently. The Levenberg-Marquardt algorithm is utilized to solve the inverse problem, and the combined identification of elastic modulus and damping coefficients is realized. Two numerical examples are provided to verify the proposed model, and satisfactory results are achieved. The measurement noise is taken into account.

Key words: moving load; combined identification; self-adaptive precise algorithm; finite element

(上接第 363 页)

Large-eddy simulation of the evolution of land form of desert

WU Chui-jie^{*1}, CHEN Jian²

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis of Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Research Center for Fluid Dynamics, Science School, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: The methods of large-eddy simulation, the motion of sand particles with mixed sand sizes and immersed boundary are used to simulate the formation and evolution of sand ripples and sand dunes. When sand ripples appear in the flat ground, at the same time, they also shown up on the sand dunes, which means that the evolution of sand ripples has multiscale nature. Besides, the effects of sand sizes to the formation and evolution of sand ripples and sand dunes, and the effects of sand dunes to the formation and evolution of sand ripples on the flat ground, are analyzed.

Key words: sand ripples; sand dunes; large-eddy simulation; mixed sand sizes; immersed boundary method; multiscale