

余潇,任兴涛,姚泽清,等. 2018. 风沙运动的欧拉双流体模型参数灵敏度分析[J]. 气象与减灾研究,41(1):51-56.  
She Xiao, Ren Xingtao, Yao Zeqing, et al. 2018. Analysis on parameter sensitivity in Euler-Euler model for wind blow sand [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 41(1):51-56.

## 风沙运动的欧拉双流体模型参数灵敏度分析

余 潇<sup>1</sup>, 任兴涛<sup>1</sup>, 姚泽清<sup>2</sup>, 赵 健<sup>1</sup>

1. 西北核技研究所, 陕西 西安 710024

2. 陆军工程大学 理学院, 江苏 南京 211101

**摘要:** 由于欧拉双流体模型的风沙流数值计算涉及的参数非常繁多,模型参数的选取会对计算结果产生很大影响。文中从欧拉双流体模型的基本方程出发,确定了 11 个模型关键参数,并给出其合理取值范围。进一步基于 Morris 灵敏度分析法,采用 Fluent 软件研究了参数不确定度对输沙率饱和值的影响,度量了各参数的重要性及其相互作用大小。计算结果表明,沙粒相直径和沙床最大堆积率是对输沙率饱和值有较大非线性影响的参数,且与其他参数之间存在一定的交互作用。镜面系数与颗粒拟温度是灵敏度较小的线性参数,且与其它参数之间基本不存在交互作用。

**关键词:** 欧拉双流体,风沙运动, Morris 灵敏度分析

中图分类号: O35

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2018)01-0051-06

doi: 10.12013/qxyjzjy2018-007

## Analysis on Parameter Sensitivity in Euler-Euler Model for Wind Blow Sand

She Xiao<sup>1</sup>, Ren Xingtao<sup>1</sup>, Yao Zeqing<sup>2</sup>, Zhao Jan<sup>2</sup>

1. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China

2. Army Engineering University of PLA, Nanjing 211101, China

**Abstract:** Based on the Euler-Euler basic equations, 11 key parameters of the model were determined, and the reasonable range of values was given. Furthermore, the influence of parameter uncertainty on the calculation results of saturate sand transport rate was discussed by Morris sensitivity analysis. The importance of each parameter and the interaction among them were evaluated. The results showed that, the diameter of sand and the maximum volume fraction of sand particle presented greater non-linear influence on saturate sand transport rate, and exhibited interaction with other parameters. The specular coefficient and the granular temperature showed a linear correlation with little sensitivity, and no interaction with other parameters can be found.

**Key words:** Euler-Euler model; wind blow sand; Morris sensitivity analysis

### 0 引 言

基于流体力学理论,风沙流属于典型的气固两相流。欧拉双流体模型具有严格的理论基础,统一的模型形式和较高的计算效率,在计算中不受模拟沙粒数目限制等优点,在风沙流数值计算中应用广

泛。在使用欧拉双流体模型研究风沙流运动时,模型输入参数是影响数值计算结果的关键因素,目前已有学者针对多相流中欧拉模型参数的确定选取开展了相关研究,给出了固定的算法或取值。Huili-net 等(2003)采用欧拉双流体模型研究了鼓泡流化床中颗粒粒径分布及颗粒间能量耗散对流化床流场

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2018-02-26.

基金项目: 国防环境安全重点支持项目(编号:WZ12503)。

作者简介: 余 潇, 硕士, 工程师, 主要从事应用数学与多相流数值计算, E-mail: sxsx126@163.com.

动力学行为的影响。Nikolopoulos 等(2012)基于欧拉双流体模型,讨论了适用于循环流化床中密集颗粒流运动的动力黏度、体积黏度等参数的取值。Raman 等(2017)将欧拉模型应用于模拟飞行器燃料反应堆中 Geldart B 粒子的运动轨迹,重点研究了曳力系数和镜面系数对其动力学行为的影响。Zhao 等(2007)采用 Fluent 软件模拟了挟沙水流对河床中固定管道的冲刷过程,考察了沙粒体积分数对管道周围河床演变的影响。国内方面,武生智和任春勇(2012)、王振波等(2016)、王康龙等(2014)考察了欧拉双流体模型在风沙运动模拟过程中,风速、沙粒粒径、曳力系数、镜面系数、碰撞系数等参数对风沙流输沙率、体积浓度变化规律的影响。

从以上研究可以看出,基于欧拉模型的多相流数值计算涉及的参数非常多,而这其中大多数参数是通过经验假设、实验测量等方法间接获取的,由于对物理理论的不完全理解和测量误差等因素,会导致相应的数值计算具有较大的不确定性。因此,需要通过灵敏度分析,研究各参数对模型计算结果的影响,度量模型参数的重要性,并按照其重要程度进行排序,以便更好地开展数值计算工作,为获得可靠计算结果打下基础。而目前在风沙多相流数值计算参数灵敏度分析方面的研究却鲜有所见。

文中从欧拉双流体模型的基本方程出发,确定适用于模拟风沙流运动的模型参数及其取值范围,以此为基础考察了参数的不确定度,进一步基于 Morris 灵敏度分析方法,采用计算流体力学软件 Fluent 研究了各参数的不确定度对输沙量饱和值的影响,度量了各参数的重要性及其相互作用大小。

## 1 数值计算模型及参数的选取

### 1.1 欧拉双流体模型

由于欧拉双流体模型遵循严格的理论基础,具有较高的计算效率,因此它是目前风沙流数值计算中应用最为广泛的一种模型。该模型在用于模拟气固两相流时,将气体与颗粒群均看作为拟流体,认为颗粒相和流体相两者是共同存在且相互贯穿渗透的连续介质,模型中用体积分数来描述每一相的存在。使用欧拉模型进行计算时,颗粒相的数量仅会受到内存要求和模型收敛的限制,只要有足够内存,任意数量的第二相都可以对其进行模拟。

欧拉双流体模型通过建立一套包含组分方程、 $n$  个动量方程及连续方程的方程组来求解每一相的流场特性。由于这些基本控制方程组是封闭的,而

描述湍流运动的方程组使用了时间平均或网格平均导致方程不封闭,因此必须对方程中出现的新未知量增加湍流模型,将新未知量与平均速度梯度联系起来而使方程封闭。文中采用标准  $k-\epsilon$  模型,通过增加描述气固两相相间湍动量传递的附加项来预测气相湍流特性,而沙粒相湍流则由 Tchen 理论预测。

### 1.2 模型参数及其取值

由于欧拉模型中涉及了大量参数,因此在开展数值计算前需要对关键参数的取值进行深入分析与研究,以保证其应用于风沙流数值计算的合理性。

通过对模型基本控制方程及附加湍流方程的深入研究,提炼出与风沙流数值计算相关的气固两相流物性参数、出入口边界及壁面条件等相关参数共 11 个。这 11 个参数中除了部分参数取默认值或推荐值外,其余参数需要根据数值计算工况模型的具体情况选取。通过综合大量数值计算、现场与风洞实验相关参考文献,在前人研究成果基础上,归纳总结出 11 个参数较为成熟及合理的算法与取值(表 1)。

表 1 欧拉模型相关参数及取值

Table 1 Parameters and values of Euler-Euler model

参数/(单位)	名称	算法及取值
$v_g/(m/s)$	空气相速度	[8,16]
$\lambda_s$	沙粒体积粘度	Lun et al 模型
$\mu_{s,kin}$	沙粒动力粘度	Gidaspow et al 模型
$\beta$	曳力系数	Syamlal-O'Brien 模型
$e_{ss}$	碰撞恢复系数	[0.7,0.99]
$\theta_s/(m^2/s^2)$	颗粒拟温度	[ $10^{-5}$ ,0.1]
$d_s/mm$	沙粒相直径	[0.1,0.4]
$\mu_{s,col}$	沙粒碰撞粘度	Gidaspow et al 模型
$\mu_{s,fr}$	沙粒摩擦粘度	Schaeffer's 模型
$\alpha_{s,max}$	沙床最大堆积率	[0.57,0.75]
$\Psi$	镜面系数	[0.005,0.05]

## 2 模型参数灵敏度分析

文中采用 Morris 方法进行参数灵敏度分析,该方法主要用于研究全局范围内模型各参数在较大范围内变化时对系统输出的影响程度。它可以通过识别模型的潜在重要参数,定性描述单个参数作用对模拟结果影响及参数间的交互作用程度。它采用“一次只改变一个参数”的抽样取值方法,轮流计算各参数的目标函数值,从而得到各个参数全局灵敏度及参数间相关性和非线性的定性描述。同时 Morris 方法受人干扰、输入参数变化范围与参数概率分布影响均较小,并且能以较少的计算获得参

数模型的全局灵敏度,适用于具有多个参数或者计算时间较长的模型,是一种高效的全局分析法(胡国标等,2015;王晓霞等,2015)。

## 2.1 Morris 算法原理

Morris 算法是 Morris (1991) 提出的一种基于 OAT (One Factor at A Time) 思想的全局灵敏度分析方法。该方法通过计算一组参数空间对应目标函数值的增长率,进一步在整个参数空间内研究目标函数值增长率的均值与标准差。

对一个包含  $k$  个参数的模型  $y = y(x_1, x_2, \dots, x_k)$ , 将模型中参数的取值范围进行标准化处理,使

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{i-1} \\ b_i \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_{i-1} & x'_i & \cdots & x'_k \\ x'_1 + \Delta & x'_2 & \cdots & x'_{i-1} & x'_i & \cdots & x'_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_1 + \Delta & x'_2 + \Delta & \cdots & x'_{i-1} + \Delta & x'_i & \cdots & x'_k \\ x'_1 + \Delta & x'_2 + \Delta & \cdots & x'_{i-1} + \Delta & x'_i + \Delta & \cdots & x'_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_1 + \Delta & x'_2 + \Delta & \cdots & x'_{i-1} + \Delta & x'_i + \Delta & \cdots & x'_k + \Delta \end{bmatrix}$$

则矩阵  $\mathbf{B}$  中相邻两行之间只有一个参数的取值不同。

(3) 将矩阵  $\mathbf{B}$  中每一行向量作为模型输入参数,带入数值计算模型中求得响应特征量  $y(b_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, k$ , 则第  $j$  个参数的“基本影响”(Elementary effect,  $Ee$ ) 为

$$Ee_{i1} = [y(b_{j-1}) - y(b_j)] / \Delta \quad (2)$$

(4) 由于 Morris 方法在生成初始参数向量时采用随机取值的方法,为了减小随机过程带来的误差,需要多次对初始参数向量进行抽样。重复步骤(1)和步骤(2)  $n$  次,每个参数可得到  $n$  个基本影响值  $Ee_{ij}$ ,  $i = 1, \dots, k$ ;  $j = 1, \dots, n$ 。

(5) 每个参数基本因素  $Ee_{ij}$  的均值  $\mu$  与标准差  $\sigma$  的计算式为

$$\mu_i = \sum_{j=1}^n Ee_{ij} / n \quad (3)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (Ee_{ij} - \mu_i)^2 / n} \quad (4)$$

计算所得均值越大说明对应输入参数的灵敏度越大,而标准差越大则说明对应参数与其他参数的交互作用越大,模型具有较强的非线性特征。

## 2.2 灵敏度分析的数值计算实验

### 2.2.1 数值计算几何区域及相关设置

由于风沙流的参数主要是沿气流水平方向和垂直方向变化,而沿展向变化则比较小,所以可将求解区域简化为二维模型。计算区域的几何尺寸(长  $\times$

得  $x_i$  的取值范围为  $[0, 1]$ , 并将其离散化,使得每个参数只能在  $\{0, \frac{1}{p-1}, \dots, 1\}$  中取值,  $p$  为参数采样

点个数。设  $\Delta$  为预先设定的参数的变化量,其取值为  $\Delta = \frac{1}{p-1}$ 。

(1) 采用 Morris 采样法随机生成一组初始参数向量  $\mathbf{X}' = (x'_1, x'_2, \dots, x'_i, \dots, x'_k)$ ,  $\mathbf{X}'$  中的  $x'_i$  是在  $\{0, \frac{1}{p-1}, \dots, 1\}$  中随机选取的。

(2) 构造  $(k+1) \times k$  矩阵  $\mathbf{B}$ :

$$\begin{bmatrix} x'_1 & x'_2 & \cdots & x'_{i-1} & x'_i & \cdots & x'_k \\ x'_1 + \Delta & x'_2 & \cdots & x'_{i-1} & x'_i & \cdots & x'_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_1 + \Delta & x'_2 + \Delta & \cdots & x'_{i-1} + \Delta & x'_i & \cdots & x'_k \\ x'_1 + \Delta & x'_2 + \Delta & \cdots & x'_{i-1} + \Delta & x'_i + \Delta & \cdots & x'_k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x'_1 + \Delta & x'_2 + \Delta & \cdots & x'_{i-1} + \Delta & x'_i + \Delta & \cdots & x'_k + \Delta \end{bmatrix}$$

高)为  $1.5 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ , 沙床厚度  $h_s = 0.05 \text{ m}$ , 平铺在下壁面之上。沙粒相按球形考虑,并假设其为单一粒径沙粒,沙粒直径的取值在表 1 中的合理范围内由 Morris 算法给出,沙粒相密度  $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ , 空气相密度  $\rho_g = 1.225 \text{ kg/m}^3$ 。图 1 为计算区域。

文中采用计算流体力学软件 Fluent 14.5 的欧拉双流体模型进行数值模拟。采用四边形网格对计算区域进行网格划分,在沙床上方对网格进行加密处理,网格总数为 43 500 个。湍流模型中的空气相湍流采用标准  $k-\epsilon$  模型,同时增加了描述气固两相相间湍动量传递的附加项,而沙粒相湍流则由 Tchen 理论预测。运用有限体积法对空间进行离散化处理,对流项采用二阶迎风格式,扩散项采用中心差分格式,对时间项采用全隐式积分方案,压力与速度的耦合采用 Simplec 算法。考虑到计算区域内风沙流运动基本达到动态平衡状态的时长约为 2.5 s, 计算时间步长  $\Delta t = 0.001 \text{ s}$ , 总计算时间  $t = 3 \text{ s}$ 。

### 2.2.2 边界条件

入口:空气相速度入口,净风场风速分布为  $u_{x=0} = \frac{u^*}{k} \ln \frac{y-h_s}{z_0}$ ; 其中,  $u_{x=0}$  为  $x=0$  处空气相入口速度;  $u^*$  为外边界层的摩阻风速;  $k$  为卡门常数 ( $k=0.4$ );  $z_0$  为空气动力学粗糙度,  $z_0 = \bar{d}_s/30$ ,  $\bar{d}_s$  为沙床颗粒的平均粒径;  $h_s$  为沙床厚度。由于计算区域中轴向风速的取值是在表 1 中的合理范围内由 Morris 算法给出,因此上式中摩阻风速的取值则是

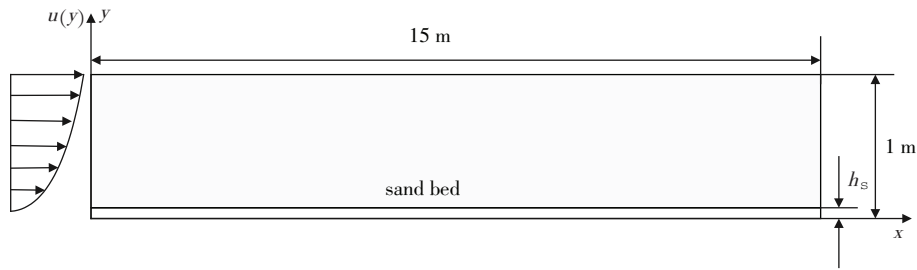


图1 数值计算几何区域

Fig. 1 Geometric regions for numerical calculation

不同轴向风速所对应的值。

出口:自由出口。

上边界:对称边界,  $v_{gy} = v_{sy} = 0$ ,  $\frac{\partial \bar{v}_g}{\partial y} = \frac{\partial \bar{v}_s}{\partial y} = 0$ ;

其中,  $v_{gy}$ 、 $v_{sy}$  分别为  $y$  处的空气相速度和沙粒相速度;  $\bar{v}_g$  和  $\bar{v}_s$  分别为空气相和沙粒相速度。

下边界:空气相为无滑移固壁边界, 即  $v_{gx} = v_{sx}$

$= 0$ ,  $v_{sy} = -\frac{6\mu_s \alpha_{s,\max}}{\sqrt{3\theta_s} \pi \Psi \rho_s \alpha_s g_{0,ss}} \frac{\partial \bar{v}_s}{\partial y}$ 。其中,  $v_{gx}$ 、 $v_{sx}$  分

别为  $x$  处的空气相速度和沙粒相速度;  $\rho_s$  为沙粒相密度;  $\alpha_s$  为沙粒相体积分数;  $g_{0,ss}$  为沙粒相碰撞概率的径向分布函数; 镜面系数  $\Psi$  的取值在表 1 中的合理范围内由 Morris 算法给出。

### 2.3 响应特征量的选择

输沙率又称单宽输沙率,是指气流在单位时间内通过单位宽度(或单位面积)所输运的沙量。该指标从宏观上反映了输沙的强弱,是衡量风沙流挟沙量的重要参数,它与风速的关系会直接影响沙漠中风沙迁移和扩展。

McEwan 等(1992)通过数值模拟风沙流的形成及发展过程,发现输沙率在空气流场的作用下随时间遵循一定的规律发展,初始状态流场区域为净风场时,风场具有较强的挟沙能力,输沙率逐步增大到饱和值,然后越来越多的沙粒进入跃移状态后,受跃移沙粒对风场的负反馈作用,沙粒对风场的阻力增大导致其挟沙能力减弱,输沙率逐步递减,最终达到稳定,这一过程被称为“overshoot”现象,这与 Butterfield(1999)风洞实验中观察到的现象一致。“overshoot”现象同样表现在输沙率沿流程的分布上,这被 Shao 和 Raupach(1992)在实验中所证实。

可以看出,风沙流数值计算中输沙率参数能够客观反映流场特性,且与时间及流程相关。通过计算和实验证明,在不同的边界条件及计算参数情况下,输沙率最终达到动态平稳的时间与流程距离是

不一样的。为了进行参数灵敏度的比较,模型参数在合理取值范围内变化较大,导致不同工况下输沙率的时间曲线或流程曲线难以比较,但将流场达到动态平稳时间内同一位置处输沙率饱和值  $Q_{\max}$  作为响应特征量是具有可比性的。

### 2.4 Morris 采样

通过前文对欧拉双流体模型参数的讨论可知,除了部分已有固定算法和取值的参数外,需要进行灵敏度分析的参数包括空气相速度  $v_g$ 、沙粒相直径  $d_s$ 、沙床最大堆积率  $\alpha_{s,\max}$ 、碰撞恢复系数  $e_{ss}$ 、镜面系数  $\Psi$ 、颗粒拟温度  $\theta_s$  等 6 个参数,表 2 给出了参数水平取值。

表2 用于灵敏度计算的参数水平取值

Table 2 Factor levels for sensitivity calculation

水平	参数					
	$v_g$	$d_s$	$\alpha_{s,\max}$	$e_{ss}$	$\Psi$	$\theta_s$
0	8.0	0.10	0.570	0.700	0.005	0.00010
1/5	9.6	0.16	0.606	0.758	0.014	0.20080
2/5	11.2	0.22	0.642	0.816	0.023	0.04006
3/5	12.8	0.28	0.678	0.874	0.032	0.06004
4/5	14.4	0.34	0.714	0.932	0.041	0.08002
1	16.0	0.40	0.750	0.990	0.050	0.10000

根据 Morris 采样方法,  $k$  为参数个数,在此  $k = 6$ 。将参数范围空间统一划分成 4 等份,即  $p = 5$ ,且令每个参数的基本因素计算 6 次。根据以上参数的设定生成 Morris 试验设计表,共需要计算 42 次。

## 3 灵敏度计算结果及分析

### 3.1 计算结果

输沙率在流场中随着时间的发展逐步趋于稳定,在 42 次计算中,响应特征量选为 2.5 s 计算时长内,  $x = 1$  m 及  $x = 10$  m 处的  $Q_{\max}$ ,它们对应的灵敏度计算结果如表 3 所示。为便于比较这两处参数对  $Q_{\max}$  的影响,将表 3 中  $\mu$  取绝对值后绘成散点图(图 2)。

表3 灵敏度计算结果

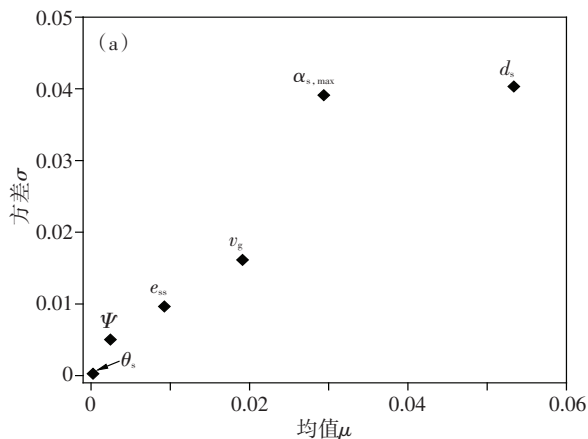
Table 3 Results of sensitivity calculation

参数	$x = 1 \text{ m}$		$x = 10 \text{ m}$	
	$\mu$	$\sigma$	$\mu$	$\sigma$
$v_g$	0.016119	0.016135	0.01669	0.025364
$d_s$	0.053366	0.040320	0.04350	0.069912
$\alpha_{s,\max}$	-0.029390	0.039132	-0.038873	0.048358
$e_{ss}$	-0.009240	0.009659	-0.011986	0.013917
$\Psi$	0.000248	0.000258	0.000980	0.001328
$\theta_s$	0.002445	0.005022	0.001280	0.002479

### 3.2 计算结果分析

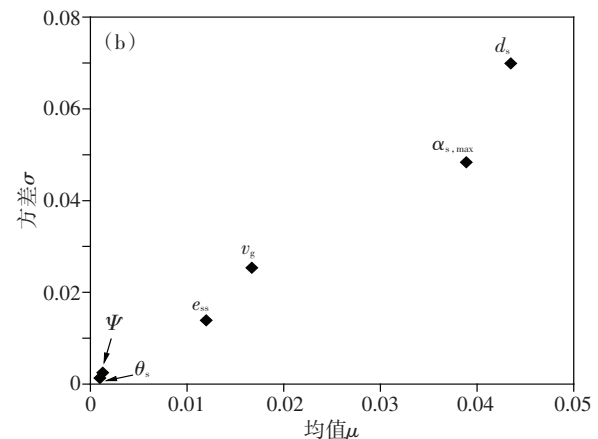
分析表3及图2可以看出,  $x = 1 \text{ m}$  及  $x = 10 \text{ m}$  两处  $Q_{\max}$  灵敏度  $\mu$ 、 $\sigma$  的计算结果虽然不同, 但呈现出一定的变化规律: 沿着计算区域  $x$  轴方向, 沙粒相直径  $d_s$ 、颗粒拟温度  $\theta_s$  这2个参数对  $Q_{\max}$  的影响呈现减小趋势, 而空气相速度  $v_g$ 、沙床最大堆积率  $\alpha_{s,\max}$ 、碰撞恢复系数  $e_{ss}$ 、镜面系数  $\Psi$  这4个参数对  $Q_{\max}$  的影响呈增加趋势。

分析计算结果发现, 相较而言, 沙粒相直径  $d_s$



和沙床最大堆积率  $\alpha_{s,\max}$  的  $\mu$  值最大, 它们是对  $Q_{\max}$  有较大影响的参数; 空气相速度  $v_g$  和碰撞恢复系数  $e_{ss}$  的  $\mu$  值较大, 它们对  $Q_{\max}$  有一定影响; 而镜面系数  $\Psi$  和颗粒拟温度  $\theta_s$  的  $\mu$  值较小, 它们是灵敏度小的参数, 对模型输出影响很小。其中沙粒相直径  $d_s$  对模型输出影响最大, 而颗粒拟温度  $\theta_s$  对模型输出影响最小。各参数对  $Q_{\max}$  既有正向影响, 又有负向影响, 其中空气相速度  $v_g$ 、沙粒相直径  $d_s$ 、镜面系数  $\Psi$ 、颗粒拟温  $\theta_s$  对  $Q_{\max}$  有正向影响, 沙床最大堆积率  $\alpha_{s,\max}$ 、碰撞恢复系数  $e_{ss}$  对  $Q_{\max}$  有负向影响。

另外, 所研究的6个参数的灵敏度方差的大小与均值大小相关, 即  $\mu$  值较大, 相应的  $\sigma$  值一般也较大。沙粒相直径  $d_s$  和沙床最大堆积率  $\alpha_{s,\max}$  的灵敏度方差较大, 说明这2个参数在影响  $Q_{\max}$  时, 与其他参数之间存在较大的交互作用, 它们对  $Q_{\max}$  的影响是非线性的。而镜面系数  $\Psi$  与颗粒拟温度  $\theta_s$  的  $\mu$  值较小, 它们与其他参数之间基本没有交互作用, 且对  $Q_{\max}$  的影响是线性的。

图2  $x = 1 \text{ m}$ (a)和  $x = 10 \text{ m}$ (b)的 Morris 灵敏度计算结果Fig. 2 Results of Morris sensitivity calculation(a,  $x = 1 \text{ m}$ , b,  $x = 10 \text{ m}$ )

## 4 结论

欧拉双流体模型形式复杂、参数繁多, 不同学者将其应用于风沙流数值计算时, 大多依靠经验确定各参数的取值, 具有一定随意性。基于欧拉双流体模型的基本理论及控制方程, 在总结大量数值计算、野外及风洞实验结果的基础上, 确定了11个对风沙流数值计算有较大影响的模型参数, 并给出其合理的算法模型及取值范围。以此为基础, 采用 Morris 灵敏度分析方法, 通过计算流体力学的软件 Fluent, 研究了6个数量型参数的不确定度对输沙量饱和值的影响, 度量了各参数的重要性及相互作用大小, 得

到以下主要结论:

1) 沿着计算区域  $x$  轴方向,  $d_s$ 、 $\theta_s$  对  $Q_{\max}$  的影响呈现减小趋势,  $v_g$ 、 $\alpha_{s,\max}$ 、 $e_{ss}$ 、 $\Psi$  对  $Q_{\max}$  的影响呈现增加趋势。

2) 6个数量型模型参数, 按照其对  $Q_{\max}$  的影响程度由大到小的顺序排列为:  $d_s > \alpha_{s,\max} > v_g > e_{ss} > \Psi > \theta_s$ , 其中  $v_g$ 、 $d_s$ 、 $\Psi$ 、 $\theta_s$  对  $Q_{\max}$  有正向影响,  $\alpha_{s,\max}$ 、 $e_{ss}$  对  $Q_{\max}$  有负向影响。

3)  $d_s$  和  $\alpha_{s,\max}$  是对  $Q_{\max}$  有较大非线性影响的参数, 且与其他参数之间存在一定的交互作用。而  $\Psi$  与  $\theta_s$  是灵敏度较小的线性参数, 且与其他参数之间基本不存在交互作用。

## 参考文献 (References)

- Butlerfield G R. 1999. Application of thermal anemometry and high-frequency measurement of mass flux to aeolian sediment transport research[J]. *Geomorphol*, 29:31-58.
- Huilin L, Yurong H, Gidaspow D, et al. 2003. Size segregation of binary mixture of solid bubbling fluidized beds [J]. *Powder Technol*, 134(1-2):86-97.
- Morris M D. 1991. Factorial sampling plans for preliminary computational experiments[J]. *Technometrics*, 33(2): 161-174.
- McEwan I K, Willetts B B, Rice M A. 1992. The grain/bed collision in sand transport by wind[J]. *Sedimentology*, 39:971-979.
- Lu H L, He Y, Dimitri G, et al. 2003. Size segregation of binary mixture of solid bubbling fluidized beds[J]. *Powder Technol*, 134(1-2):86-97.
- 胡国标, 邹益胜, 姜杰, 等. 2015. 基于 Morris 方法的车轴结构参数灵敏度分析[J]. *机械制造*, 53(611):4-7. Hu G B, Zou Y S, Jiang J, et al. 2015. Sensitivity analysis of axle structural parameter based on the method of Morris[J]. *Machinery*, 53(611):4-7. (in Chinese)
- Nikolopoulos A, Nikolopoulos N, Varveris N, et al. 2012. Investigation of proper modeling of very dense granular flows in the recirculation system of CFBs[J]. *Particool*, 10(6):699-709.
- Raman S, Jan M, Falah A, et al. 2017. Euler-Euler CFD simulation of the fuel reactor of a 1MWth chemical-looping pilot plant: Influent of the drag model and specular coefficient[J]. *Fuel*, 200:435-446.
- Shao Y, Raupach M R. 1992. The overshoot and equilibration of saltation[J]. *J Geo Res: Atmos*, 97(D18):20559-20564.
- 王康龙, 武建军, 罗生虎. 2014. 风沙运动的欧拉双流体模型参数研究[J]. *中国沙漠*, 34(6):1461-1468. Wang K L, Wu J J, Luo S H. 2014. Investigation of parameters in Euler two-phase model for wind blow sand[J]. *J Desert Res*, 34(6):1461-1468. (in Chinese)
- 武生智, 任春勇. 2012. 基于欧拉双流体模型的风沙运动模拟[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 48(1):104-107. Wu S Z, Ren C Y. 2012. Numerical simulation of wind blown sand based on the Eulerian model[J]. *J Lanzhou University (Nat Sci Edi)*, 48(1):104-107. (in Chinese)
- 王晓庆, 武建军. 2013. 最大沙粒堆积率对风沙流结构的影响[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 49(5):104-107. Wang X Q, Wu J J. 2013. Effect of the maximum volume fraction of sand particles on wind blown sand structure[J]. *J Lanzhou University (Nat Sci Edi)*, 49(5):104-107. (in Chinese)
- 王晓霞, 贾玉玺, 董抒华. 2015. 基于 Morris 方法的纤维复合材料结构件固化均匀性的全局灵敏度分析[J]. *复合材料学报*, 32(4):1211-1217. Wang X X, Jia Y X, Dong S H. 2015. Global sensitivity analysis of curing uniformity of fiber composite structures based on Morris method[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 32(4):1211-1217. (in Chinese)
- 王振波, 张玉春, 徐春明. 2016. 不同曳力模型及颗粒碰撞恢复系数对短接触旋流反应器内气固流场的影响[J]. *化工学报*, 65(6):2034-2041. Wang Z B, Zhang Y C, Xu C M. 2016. Effect of drag model and restitution coefficient on gas-solids flow field in quick-contact cyclone reactors[J]. *J Chem Ind Eng*, 65(6):2034-2041. (in Chinese)
- Zhao Z H, Fernando H J S. 2007. Numerical simulation of scour around pipelines using an Euler-Euler coupled two-phase model [J]. *Environ Fluid Mech*, 7(2):121-142.