

基于 CFD 的罩盖防飘移机理模拟及防飘移效果量化研究

王俊¹ 祁力钧¹ 孙小华²

(1. 中国农业大学 工学院, 北京 100083; 2. 河北软件职业技术学院, 河北 保定 071000)

摘要 探讨双圆弧罩盖的防飘移机理,对其防飘移效果进行量化研究。利用 CFD 技术对不同条件下双圆弧罩盖内部及周围的喷雾速度流场、雾滴运动轨迹进行模拟,研究喷嘴安装参数、喷嘴类型和型号,及风速对飘移率的影响。结果表明,双圆弧罩盖的防飘移机理是:内外圆弧形成的导风道使其下方产生了高速向下的气流(最大达 7.42 m/s)和低速水平气流;双圆弧罩盖能有效减弱其后方的涡流强度,使其内外较大区域形成水平负向和垂直向下的速度流场。喷嘴的安装位置和安装角度与雾滴飘移率高度相关,相关系数为 0.974;喷嘴类型、型号、风速、喷嘴类型和风速的交互作用,以及喷嘴型号和风速的交互作用与飘移率也高度相关,相关系数 0.981。双圆弧罩盖能有效防止雾滴飘移,提高雾滴沉积率。

关键词 双圆弧罩盖; CFD 模拟; 防飘移; 雾滴; 飘移率

中图分类号 S 491

文章编号 1007-4333(2007)04-0095-06

文献标识码 A

Simulation and quantification on drift-reduction of double-foil shield

Wang Jun¹, Qi Lijun¹, Sun Xiaohua²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. Hebei Software Institute, Baoding 071000, China)

Abstract The anti-drift principle and drift-reduction rate of double-foil shield spraying technology was studied in this paper. In order to analyze the effect of nozzle setting position (horizontal distance, vertical distance) and spray angle, the effect on drift rate of nozzle type, nozzle size and air velocity on drift rate, the velocity field and droplet trajectory in and around double-foil shield were simulated under different conditions by using the CFD software. The simulated result showed that the anti-drift principles of the shield are: 1) high-speed downward airflow and low-speed horizontal airflow was formed under double oil shield (the maximal speed is 7.42 m/s); and 2) air turbulence intensity behind the shield was obviously weakened and a big area of negative horizontal and negative vertical velocity fields was formed. Moreover, the regression result suggested that there was a high correlation relation among nozzle setting position, spray angle and drift rate and the correlation numbers were 0.974 and 0.981 among air velocity, nozzle size, nozzle type and drift rate. In a word, double-foil shield spraying technology could effectively reduce drift rate and increase deposition rate.

Key words double-foil shield; CFD simulation; drift reduction; droplet; drift rate

罩盖防飘移技术已广泛应用于各种不同的农药施用场合,相对于其他防飘移技术具有结构简单、形式多样、不需附加动力等特点;但罩盖防飘移技术对罩盖的形状尺寸和与雾体的配合有较高要求,结构参数优化是该领域的研究重点。国内外对防飘移罩盖的研究^[1-6]多集中在罩盖结构的改进方面,而对

喷嘴类型、型号及喷嘴在罩盖下的安装位置和安装角度对防飘性能影响的研究较少,对这些参数影响雾滴飘移率的量化研究未见报道。本研究拟采用 CFD 技术对双圆弧罩盖周围的喷雾流场进行模拟,分析其防飘移机理,并进一步研究喷嘴的安装角度、安装位置及喷嘴类型和型号与防飘移性能的函数关

收稿日期: 2007-02-09

基金项目: 国家科技支撑计划(2006BAD28B05-03)

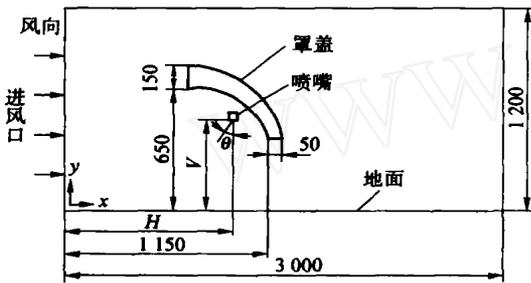
作者简介: 王俊,博士研究生, E-mail: wangjun678@tom.com; 祁力钧,副教授,博士,通讯作者,主要从事农药喷施技术及设备研究, E-mail: qilijun@cau.edu.cn

系,以期为这些参数的选择、优化及双圆弧罩盖技术防飘移性能的进一步提高提供理论依据。

1 模拟试验的计算模型及相关参数

1.1 流场区域的划分

考虑到设定流场区域既不能影响雾滴的运动又要与实际情况相符,本研究采用图1所示的模拟试验流场区域。该流场区域为3 000 mm × 1 200 mm的二维区域,罩盖安装在喷嘴正上方,内圆弧半径300 mm,外圆弧半径为500 mm,罩盖在模拟区域内的相对位置固定不变,喷嘴类型、型号、安装角度及安装位置(与进风口的水平距离 H 和与地面的垂直距离为 V)根据具体试验调整。



长度单位, mm。 H —喷嘴与进风口的水平距离; V —喷嘴离地面的垂直距离; θ —喷嘴安装角度(雾滴的喷射角度)。(表2、3同)。

图1 模拟试验的流场区域示意图

Fig. 1 Structure and size of simulation zone

1.2 雾滴飘移的指标界定

为量化药液喷施过程中的雾滴飘移情况,将喷嘴下风向3 000 mm处定义为飘失边界(图1),将通过该界面的雾滴总质量设为飘移量 D ,飘移量与喷施药液量 Q 的比值定义为飘移率^[7] P ,则有

$$P = \frac{D}{Q} \times 100\%$$

各个工况下的模拟都重复3次,取其平均值为最终飘移率。

1.3 仿真试验条件假设

为使模拟条件与实际喷施条件一致,同时节约模拟计算时间,根据文献^[8-10]做如下假设。

1) Lagrangian 离散相模型假设:研究中雾滴在流场中运动时的体积率小于10%,故假设模拟过程满足Lagrangian 离散相模型;

2) 壁面无滑移条件假设:罩盖表面及模拟区域边界壁面的风速均为0;

3) 气流源水平、稳定假设:只考虑流场入口的水平方向气流,假设无垂直分量,且气流入口速度稳定不变;

4) 雾滴分布规律假设:假设雾滴径谱服从Rosin-Rammler 分布^[11];

5) 离散相边界条件假设:把出口边界设为“escape”边界条件,地面设为“trap”边界条件,其他各个壁面边界设为“reflect”边界条件。

1.4 仿真试验物理模型

雾滴在大气中的运动不仅受重力和空气阻力的作用,同时在沉积、飘移、蒸发过程中伴随着传质、传热及动量交换,因此仿真计算中须考虑运动过程中遵守的计算流体力学物理模型。在仿真试验的数值计算中涉及到的主要物理模型如下。

流体动力学控制方程:包括质量守恒、动量守恒和能量守恒定律,通用数学描述为

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\phi) = \text{div}(\rho D \text{grad}\phi) + S_\phi \quad (1)$$

式中: ϕ 为通用变量,表示 u 、 v 、 w 、 T 等求解变量; D 为广义扩散系数, S_ϕ 为广义源项。

标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型:研究中 $Re > 10^5$, 结合假设可知模拟中气流处于稳定的湍流状态,因此选取标准 $k-\epsilon$ 两方程湍流模型,其形式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial(k)}{\partial t} + \frac{\partial(ku_i)}{\partial x_i} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} + \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_D \frac{k^{3/2}}{l} \right] \\ &= \mu \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right] \end{aligned} \quad (2)$$

式中: k 、 C_D 和 C_μ 为经验常数; μ 为湍流黏度;其他参数参考 Fluent 用户手册。

颗粒力平衡方程:Fluent 中笛卡尔坐标系下 y 方向的颗粒力平衡方程为

$$\frac{d u_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_y(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_y \quad (4)$$

其中: $F_D(u - u_p)$ 为颗粒单位质量曳力; u 为流体相速度; u_p 为颗粒速度; ρ 为流体密度; ρ_p 为颗粒密度; d_p 为颗粒直径。式(1)~(4)中各个参数的具体表达式及取值也可参考 Fluent 用户手册。

1.5 连续相与离散相参数的确定

模拟试验中连续相及离散相主要参数见表1。

Fluent Inc. Fluent version 4.3 user's manual. Computational fluid dynamics software. Lebanon, NH: Fluent Inc., 1995

参考相关文献^[12], 本研究将雾滴初速度设为 20 m/s, 初始位置设定在喷嘴处; 雾滴初始温度为 12 °C; 假设其分布遵循函数 $f = f(d_l, v_l, x_l, T_l)$, 即表示直径为 d_l 、速度 v_l 、位置 x_l 、温度 T_l 的雾滴所出现的概率密度。这样雾滴直径的分布函数就是以雾滴直径为自变量的函数。由激光粒度仪测得雾

滴分布数据并代入该函数, 即可确定其中的各参数, 从而将该函数拟合成 Rosin-Rammler 指数方程形式

$$Y_d = \exp[-(\bar{d}/d)^n]$$

其中: Y_d 为直径大于 d 的雾滴的质量百分率, %; d 为雾滴直径, μm ; \bar{d} 为雾滴的平均直径, μm ; n 为分布指数。

表 1 模拟试验中连续相和离散相的主要物理参数

Table 1 Parameters of continuous and discrete phases used in simulation

连续相(空气)		离散相(水, 雾滴)	
项 目	参 数	项 目	参 数
温度/ K	288	温度/ K	285
密度/ (kg/ m ³)	1.225	密度/ (kg/ m ³)	998.200
发光强度/ cd	1 006	发光强度/ cd	4 182
热传导率/ (W/ (m ·K))	2.42 ×10 ⁻²	热传导率/ (W/ (m ·K))	0.600
黏度/ (Pa ·s)	1.789 ×10 ⁻⁵	黏度/ (Pa ·s)	1.203 ×10 ⁻³
摩尔质量/ (g/ mol)	28.966	摩尔质量/ (g/ mol)	18.015
湍流强度/ %	10	挥发点/ K	273
流速/ (m/ s)	具体试验确定	沸腾点/ K	373
相对湿度/ %	15	表面张力/ (N/ m)	7.19 ×10 ⁻²

2 模拟试验及模拟结果

为了明显观察双圆弧罩盖的防飘移效果, 应选用产生较多小雾滴的小型号喷嘴, 并选择较高的工作压力进行模拟试验。本试验选用 Tejeet 公司 XR11001 型喷嘴, 施药压力为 400 kPa, 对应流量 0.45 L/min, 测得雾滴直径分布范围 22.49 ~ 258.95 μm , 平均直径 136.10 μm , 分布指数 3.45。取进风口风速 4 m/s, 喷嘴与进风口水平距离 $H = 1\ 000\ \text{mm}$ 、与地面垂直距离 $V = 500\ \text{mm}$, 喷嘴安装角度 $\alpha = 0^\circ$ 。经过模拟并对模拟结果进行后处理, 分别得到双圆弧罩盖周围的速度流场图(图 2), x 、 y 方向的速度矢量图(图 3)和雾滴运动轨迹图(图 4)。

2.1 双圆弧罩盖的防飘移机理

由图 2 可见, 罩盖内外圆弧间形成导风道, 并在罩盖出风口产生风幕, 形成了较大的 y 向气流速度, 这有助于胁迫雾滴向靶标沉降, 从而缩短了雾滴在空中的运动时间, 减少了雾滴的蒸发损失, 有效减少了飘移。分析图 3(a) 可见, 双圆弧罩盖内部及周围的流场中, 导风道下方附近气流 x 方向速度 v_x

较小, 减小了气流对雾滴的吹送作用, 便于雾滴沉积; 罩盖后方形成的涡流速度较低, 减小了气流对细小雾滴的卷吸作用, 并且在罩盖后方 v_x 的气流区域较大, 进一步有效减少了雾滴飘移量。由图 3(b) 可见, 大部分模拟区域的气流 y 方向速度 v_y 较大, 尤其是喷嘴附近区域以及内外圆弧形成的导风道下方, 此处的气流 y 方向速度 v_y 最大可达 7.42, 并且罩盖后方大部分区域内的气流 y 方向速度矢量方向向下, v_y 值较大, 这都有助于促进雾滴沉积。

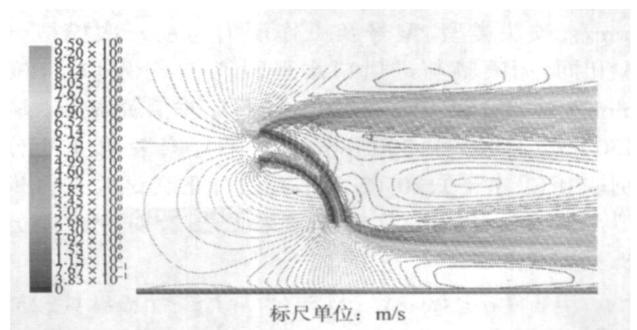


图 2 双圆弧罩盖内部及周围速度场模拟结果

Fig. 2 Velocity field in and around double-foil shield

上述双圆弧罩盖的防飘移效果可从最终的雾滴

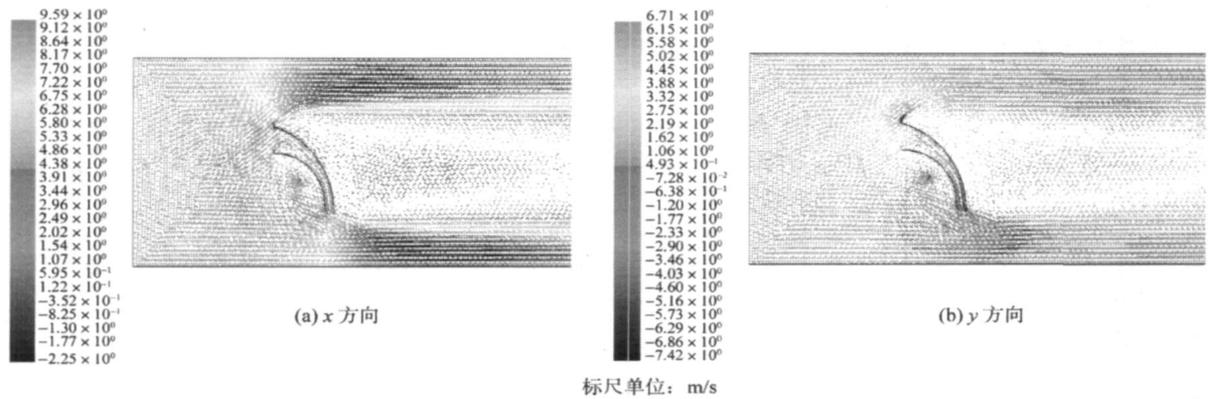


图3 双圆弧罩盖内部及周围气流沿 x、y 方向的速度矢量图

Fig.3 Velocity vector of x and y axis inside and around double-foil shield

运动轨迹图(图4)体现出来:在双圆弧罩盖的作用下,只有很少量的雾滴发生了飘移。

表2 飘移率模拟正交试验因素、水平安排及模拟结果

Table 2 Simulation results of drift rate under different factors and status

试验号	因素						飘移率/%
	H	V	H×V	H×	V×	H×V×	
1	1	1	1	1	1	1	39.90
2	1	1	1	2	2	2	44.69
3	1	2	2	1	1	2	45.13
4	1	2	2	2	2	1	48.83
5	2	1	2	1	2	1	38.44
6	2	1	2	2	1	2	42.51
7	2	2	1	1	2	2	40.15
8	2	2	1	2	1	2	44.59

注: ×表示两因素的交互作用,如 H× 表示 H 和 的交互作用对飘移率的影响。下表同。

表3 H、V 及 对飘移率 P 影响的方差分析

Table 3 Analyze of effect of H, V and to P

来源	平方和 S	自由度 f	均方和 \bar{s}	F 值
因素 H	20.67	1	20.67	19.59
因素 V	21.65	1	21.65	20.52
因素	36.13	1	36.13	34.25
误差 e	4.22	4	1.06	
总和 T	82.67	7		

$F_{0.1}(1,4) = 4.54,$
 $F_{0.05}(1,4) = 7.71,$
 $F_{0.01}(1,4) = 21.2$

间的定量关系,假设 3 因素与飘移率的回归模型为

$$P = H + V + + c$$

式中: 、和 为变量系数;c 为常数项。为消除各

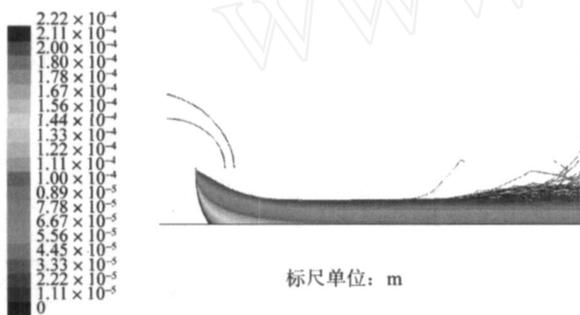


图4 双圆弧罩盖技术下喷雾流场的雾滴运动轨迹

Fig.4 Droplets trajectory under double-foil shield spraying

2.2 喷嘴安装位置和安装角度对飘移率的影响

2.2.1 试验方案、结果及方差分析

为了使试验效果明显,更好地研究在罩盖下喷嘴安装位置和角度对雾滴飘移的影响程度,本次试验进风口风速增至 6 m/s,喷头类型、型号及工作压力与前一次模拟试验相同,而喷嘴与进风口水平距离 H 分别取 1 000 mm(1 水平)、1 050 mm(2 水平),垂直距离 V 取 450 mm(1 水平)、500 mm(2 水平),安装角度 分别取 0°(1 水平)、20°(2 水平),设计正交试验进行模拟。试验设计方案及模拟结果见表 2,对应方差分析见表 3。

由于 $F_H > F_{0.05}(1,4) = 7.71$, $F_V > F_{0.05}(1,4) = 7.71$, $F > F_{0.01}(1,4) = 21.2$,所以因子 H、V 在 = 0.05 水平下对飘移率的影响是显著的,因子 在 0.01 水平下显著。

2.2.2 回归分析

为定量分析飘移率与 H、V 及

变量因量纲不同造成的影响,对试验结果进行标准化变换后进行回归分析。变换公式为

$$x_i \rightarrow x_i = \frac{x_i - \bar{X}}{\sqrt{S_{XX}}}$$

其中： $S_{XX} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2$ 为变量样本方差； \bar{X} 为模拟结果的平均值。标准化后的模拟结果见表 4。

表 4 H、V、和 P 回归参数的样本标准化值

Table 4 Standardization results of H、V、 and P

参数	标准化值							
H	-0.94	-0.94	-0.94	-0.94	0.94	0.94	0.94	0.94
V	-0.94	-0.94	0.94	0.94	-0.94	-0.94	0.94	0.94
	-0.94	0.94	-0.94	0.94	-0.94	0.94	-0.94	0.94
P	-0.91	0.48	0.61	1.69	-1.34	-0.15	-0.84	0.45

表 5 不同喷嘴类型、型号及风速时的雾滴飘移率 P

Table 5 Drift rate under different nozzle type, nozzle size and wind speed

喷嘴型号	压力/ kPa	流量/ (L/ min)	风 速/ (m/ s)				
			2.0	3.0	4.0	5.0	6.0
F-015-110	300	0.66	15.17	22.64	31.08	39.87	48.96
F-03-110	300	1.26	6.52	9.99	15.48	21.13	30.03
LD-015-110	300	0.66	7.37	11.31	17.73	25.79	35.02
LD-03-110	300	1.32	3.88	6.80	11.31	17.35	24.24
INJ ET015	300	0.66	2.05	3.56	5.65	9.28	15.50
INJ ET03	300	1.20	1.63	2.61	3.85	5.98	10.09

注：飘移率 P, %。

试验前的初步分析表明,风速与喷嘴类型、喷嘴类型和型号之间存在交互作用,需用非线性数学模型进行回归分析。假设非线性回归方程为

$$P = aS + bT + cR + d(R \times S) + g(R \times T) + f$$

式中：P 为雾滴飘移率, S 为风速, T 为喷嘴型号, R 为喷嘴类型, a、b、c、d 和 g 为回归系数, f 为常数项。进行标准化转换,并在 SPSS 软件非线性回归模型中采用迭代方法求解,经回归分析和还原后得到的喷嘴类型、型号、风速及其相互作用与飘移率之间的非线性回归模型

$$P = 0.3005S - 0.155T - 0.282R -$$

$$0.13(R \times S) + 0.10(R \times T) - 1.36 \times 10^{-4} \quad (6)$$

该回归模型的多元相关系数 $R = 0.981$, 模型假设检验的相伴概率为 0.000, 各回归系数显著性水平也都小于 0.01, 表明回归模型拟合得很好。

经 SPASS 软件回归和数据还原,喷嘴水平距离 H、垂直距离 V 及安装角度 与雾滴飘移率 P 的线性回归方程为

$$P = -0.250H + 0.256V + 0.3305 - 6.94 \times 10^{-18} \quad (5)$$

回归模型的多元相关系数 $R = 0.974$, 模型假设检验的相伴概率为 0.0005, 各回归系数显著性水平均小于 0.05, 表明回归模型拟合较好。

2.3 喷嘴类型、型号及风速对飘移率的影响

本试验选用 3 种类型的喷嘴：F 标准扇形喷嘴 (F-015-110 和 F-03-110)、LD 低飘移喷嘴 (LD-015-110 和 LD-03-110) 以及 INJET 气滴喷嘴 (INJET015 和 INJET03), 工作压力 300 kPa, 各喷嘴对应流量、雾滴分布指数数据通过试验测量得到, 并作为参数输入 Fluent 中, 模拟结果见表 5。

3 结 论

1) 双圆弧罩盖能有效减少飘移。罩盖内外圆弧形成的导风道,使其下方产生了高速向下的气流(最大达 7.42 m/s)和低速水平气流;双圆弧罩盖有效减弱了其后的涡流强度,使其内外较大区域内形成水平负向和垂直向下的速度流场。

2) 模拟分析结果表明,喷嘴安装位置、安装角度与飘移率有显著影响,相关系数 $R = 0.974$ 。

3) 喷嘴类型、型号和风速及其相互作用与飘移率也高度相关,相关系数 $R = 0.981$ 。

参 考 文 献

[1] Sidahmed M M, Brown R B. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry air-blast sprayer: Part I: Air jet model[J]. Transactions of the ASAE, 2001,

- 44(1) : 5-10
- [2] Ozkan H E, Miralles A, Sinfort C, et al. Shields to reduce spray drift[J]. *J Agric Eng Res*, 1997, 67(4) : 311-322
- [3] Tsay J, Ozkan H E, Brazee R D, et al. CFD simulation of mechanical spray shields [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(5) :1271-1280
- [4] 曾爱军. 减少农药雾滴飘移的技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2005
- [5] Sidahmed M M, Awadalla H H, Haidar M A. Symmetrical multi-foil shields for reducing spray drift[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(3) : 305-312
- [6] Smith D B, Harris F D, Butler B J. Shielded sprayer booms to reduce drift [J]. *Transactions of the ASAE*, 1990, 25(6) :1499-1503
- [7] Tsay J, Fox R D, Ozkan H E, et al. Evaluation of a pneumatic-shielded spraying system by CFD simulation [J]. *Transactions of the ASAE*, 2002, 45(1) : 47-54
- [8] 王福军. 计算流体力学分析——CFD软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004
- [9] 吴子牛. 计算流体力学基本原理[M]. 北京: 科学出版社, 2001
- [10] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1988
- [11] Tsay J R, Liang L S, Lu L H. Evaluation of an air-assisted boom spraying system under a no-canopy condition using CFD simulation [J]. *Transactions of ASAE*, 2004, 47(6) : 1887-1897
- [12] Tsay J, Ozkan H E, Brazee R D, et al. CFD Simulation of moving spray shields[J]. *Transactions of ASAE*, 2002, 45(1) : 21-26

www.cnki.net