排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2014 年 3 月 Mar. 2014 | 第 32 卷 第 3 期 Vol. 32 No. 3

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.13.0163

基于 CFD 的砂石覆盖对近地表风场的影响


赵文举

赵文举[1]，宋建树[1]，马孝义[2]，赵廷红[1]
（1. 兰州理工大学能源与动力工程学院，甘肃 兰州 730050；2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室，陕西 杨凌 712100）

摘要：为了抑制由风蚀引起的土地荒漠化进程及促进农牧业生产，对西北贫瘠土地采取砂石覆盖、植被覆盖、作物留茬等多种保护措施，能够明显改善近地表风场、有效减小风蚀、保持土壤水分和减缓土地退化. 针对砂石覆盖模式，基于 CFD 方法对砂石粒径为 2.0～12.0 mm、风速为 5，13 m/s 的砂石覆盖近地表风场进行三维稳态模拟，并进行了现场观测. 研究结果表明：距地面同一高度下，砂石覆盖对近地表风速的削弱度随粒径增大而增大，当粒径超过 10.0 mm 后削弱度基本不变；削弱度增幅随粒径增大而减小；同一粒径下，削弱度随地面高度的增大而减小；对比 5，13 m/s 这 2 种风速条件下，削弱度对风速的变化不敏感. 通过现场观测结果发现，模拟所得削弱度较实测所得削弱度精度达 89% 以上. 研究可为干旱区生态农业发展提供理论依据.

关键词：砂石覆盖；粒径；风速；削弱度；计算流体动力学
中图分类号：S277.9；S157　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2014)03-0258-05
赵文举，宋建树，马孝义，等. 基于 CFD 的砂石覆盖对近地表风场的影响[J]. 排灌机械工程学报，2014，32(3)：258-262，270.

Effects of gravel coverage on CFD-based near-surface wind field

Zhao Wenju[1]，*Song Jianshu*[1]，*Ma Xiaoyi*[2]，*Zhao Tinghong*[1]
(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Wind erosion is one of the main reasons for land desertification in Northwest China. To suppress the desertification progress and promote both agricultural and livestock production, many protective measures, such as gravel and vegetation coverage, crop stubble and so on, have been applied in barren lands in Northwest China. In consequence, the near-surface wind field was improved significantly and the wind erosion has been reduced effectively, and the soil moisture has been maintained, eventually the land degradation has been slowed down. In the paper, the three-dimensional, steady near-surface wind fields around a series of gravel coverage were simulated by CFD method for 2.0 mm－12.0 mm gravel size at 5 m/s and 13 m/s wind speeds, respectively; meanwhile, field observations were conducted. The results show that at the same height above the ground the degree of reduction of near-surface wind velocity rises with increasing gravel size until the size reaches 10.0 mm; once the size is beyond that value, the degree doesn't change with gravel size basically. The increment in degree of reduction of wind velocity increases with gravel size; moreover, at the same gravel size, the degree of reduction decreases with height apart from the ground. It was found out that the degree of reduction of wind velocity

收稿日期：2013-07-09；网络出版时间：2014-03-20
网络出版地址：http://www.cnki.net/kcms/doi/10.3969/j.issn.1674-8530.13.0163.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51269008，51279167)；甘肃省高等学校科研计划项目(2013B-019)；兰州理工大学红柳青年教师培养计划项目(Q201310)
作者简介：赵文举(1981—)，男，甘肃永昌人，副教授，博士(wenjuzhao@126.com)，主要从事农业水土工程研究.
宋建树(1989—)，男，河北威县人，硕士研究生(sjssongjianshu@163.com)，主要从事农业水土工程研究.

is insensitive to change in wind velocity by comparing the results at 5 m/s and 13 m/s wind speeds. The predicted degree of reduction of wind speed matches the field observation as good as more than 89%. This study can provide a theoretical basis for development of ecological agriculture in an arid area.

Key words: gravel coverage; particle size; wind velocity; weakening rate; computational fluid dynamics

土壤风蚀是西北干旱半干旱土地退化的主要原因之一[1]. 砂石覆盖、植被覆盖、作物留茬等多种保护性耕作模式能改善近地表风场,有效减小土壤风蚀和蒸发,增加水分的入渗,阻止水土流失,有利于提高作物产量. 许多学者对土壤风蚀的特性和保护性耕作下风蚀效应进行了大量研究,取得了很多成果. 如陈智等[1]、李晓丽等[2]研究了地表风沙流特性和土壤风蚀物中沙粒的动力学特性,表明在残茬高度内,风速随高度的减小而急剧减小,极大地削弱了对地表土壤的风蚀能量;冯晓静等[3]研究得出风蚀对土壤营养物质及有机质的流失高于土壤的流失;Wolfe 等[4]、Hupy 等[5]基于空气动力学理论,揭示了植被覆盖能有效提高地表空气动力学粗糙度、降低风速和阻挡沙尘,对地表起到保护作用;赵永来等[6]通过试验发现农田地表的风蚀量随地表作物残茬盖度的增大而减小,在高风速下作物残茬抑制风蚀效果愈加显著.

目前,保护性耕作模式的抗风蚀研究大多侧重于作物留茬[7-10]和植被覆盖[11-12],而砂石覆盖的研究鲜有报道. 为此,文中基于 CFD 方法,模拟砂石覆盖的抗风蚀效应,分析砂石粒径对近地表风场的影响,为旱区生态农业发展提供理论依据.

1　CFD 数值模拟

1.1　CFD 模拟原理

CFD 是在流动基本方程控制下对流动的数值模拟,为把原来物理量在时间域及空间域上连续的场(如速度场和压力场)用一系列有限个离散点上的变量值的集合代替,通过一定的原则和方式建立起关于这些离散点上场变量之间关系的代数方程组,然后求解代数方程组获得场变量的近似值,可得到流场内各个位置上基本物理量的分布.

1.2　控制方程

连续性方程

$$\frac{\partial}{\partial t}\iiint_V \rho \mathrm{d}V + \oiint_S \rho v \mathrm{d}S = 0, \tag{1}$$

式中:ρ 为流体密度;v 为流体速度;V 为控制体;S 为控制面. 等式左边第 1 项表示控制体 V 内部质量的增量;第 2 项表示通过控制面 S 流入控制体的净通量[13].

动量方程

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u v) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau xx}{\partial x} + \frac{\partial \tau yx}{\partial y} + \frac{\partial \tau zx}{\partial z} + \rho f_x, \tag{2}$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla(\rho v v) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau xy}{\partial x} + \frac{\partial \tau yy}{\partial y} + \frac{\partial \tau zy}{\partial z} + \rho f_y, \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla(\rho w v) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau xz}{\partial x} + \frac{\partial \tau yz}{\partial y} + \frac{\partial \tau zz}{\partial z} + \rho f_z, \tag{4}$$

上述式中:u,v,w 分别为流体速度在 x,y,z 方向的分量;t 为时间;∇ 为笛卡儿坐标系下的向量算子,$\nabla = i\frac{\partial}{\partial x} + j\frac{\partial}{\partial y} + h\frac{\partial}{\partial z}$;$p$ 为流体微元上的压力;τ_{xy} 为切应力;f 为作用在单位质量流体微团上的体积力[14].

能量方程

$$\begin{aligned}&\frac{\partial}{\partial t}\left[\rho\left(e+\frac{v^2}{2}\right)\right] + \nabla\left[\rho\left(e+\frac{v^2}{2}\right)v\right] = \\ &\rho\tilde{q} + \frac{\partial}{\partial x}\left(k\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(k\frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right) - \\ &\frac{\partial(up)}{\partial x} - \frac{\partial(vp)}{\partial y} - \frac{\partial(wp)}{\partial z} + \frac{\partial(u\tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(u\tau_{yx})}{\partial y} + \\ &\frac{\partial(u\tau_{zx})}{\partial z} + \frac{\partial(v\tau_{xy})}{\partial x} + \frac{\partial(v\tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(v\tau_{zy})}{\partial z} + \\ &\frac{\partial(w\tau_{xz})}{\partial x} + \frac{\partial(w\tau_{yz})}{\partial y} + \frac{\partial(w\tau_{zz})}{\partial z} + \rho f v,\end{aligned} \tag{5}$$

式中:$e+\frac{v^2}{2}$ 为流体微元的总能量;$\tilde{q}$ 为单位质量的体积加热率;λ 为热导率;T 为温度.

1.3　湍流模型的建立

模拟视空气流动为完全湍流的流动过程,忽略分子黏性的影响,选用标准 $k-\varepsilon$ 模型进行计算. 湍流动能输运方程可以通过精确的方程推导得到,耗散率输运方程通过物理推理、数学模拟相似原型方程得到.

1) 湍流动能 k 的输运方程

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu_t + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial u}{\partial x_j}\right] +$$

$$\mu_t\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial v_i}{\partial x_j}-\rho\varepsilon, \tag{6}$$

式中：$\mu_t=\rho C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}$；$\varepsilon=C_D\frac{k^{3/2}}{L}$，$\varepsilon$ 为湍流动能耗散率；$i=1,2,3$；j 为求和下标；σ_k，C_μ，C_D 为湍流模型常数，σ_k 取 1.0，C_μ 取 0.09，C_D 取 0.08～0.38[15]。

2）湍流动能耗散率 ε 的输运方程

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho v_j\varepsilon)}{\partial x_j}=\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\partial t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_j}\right]+$$

$$C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}\mu_t\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial v_i}{\partial x_j}-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}, \tag{7}$$

式中：μ 为动力黏度；k 为湍流动能；μ_t 为湍流黏性系数；σ_ε，$C_{1\varepsilon}$，$C_{2\varepsilon}$，σ_k 为湍流模型常数，分别取 1.30，1.44，1.92，1.00[15]。

1.4 网格划分

文中利用 Gambit 进行网格划分，并导出网格文件，采用由线到面再到体的六面体网格. 模拟主要研究近地表风场变化，故对近地表区域的网格进行加密. 模型尺寸为 30 m×20 m×10 m，网格模型如图 1 所示.

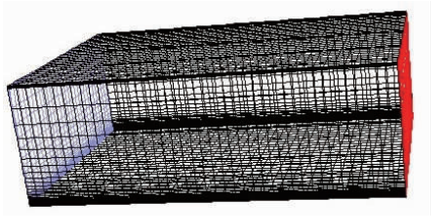


图 1 网格模型

Fig. 1 Mesh pattern in fluid domain

1.5 Fluent 计算

1）求解器及计算模式

Fluent 提供了分离式和耦合式 2 种求解器. 模拟视空气流为微可压缩流动，选择分离式求解器进行计算，选用三维稳态的隐式计算模式.

2）边界条件

模型进口设为速度进口，出口设为自由出流，温度为 288.15 K，压强为 1.03×10^5 Pa.

2 结果与分析

中国的砂石覆盖保护性耕作模式起源于甘肃中部的景泰县与永登县一带，主要分布在甘肃中部、宁夏、新疆和青海等地的干旱半干旱地区，在世界上其他降水稀少的地方也有分布. 文中以景泰县压砂地为研究对象，当地有风日年平均风速为 5 m/s，大风日年平均风速为 13 m/s，故选择 5，13 m/s 为模拟风速.

2.1 风速为 5 m/s 时砂石覆盖的影响

当进口风速设为 5 m/s 时，覆盖砂石的粒径不同对近地表风场影响不同，假定当地裸地土壤的平均粒径为 0.2 mm，砂石覆盖厚度选为 150 mm，则距地面 20 cm 处风速的变化情况如图 2 所示，图中 d 为粒径，θ 为风速. 因 $d=12.0$ mm 时距地面 20 cm 处风速分布图与 $d=10.0$ mm 时的分布图基本无差别，故未列出. 图 2a－f 中起始风速分别为 4.5，4.2，4.0，3.9，3.8，3.8 m/s.

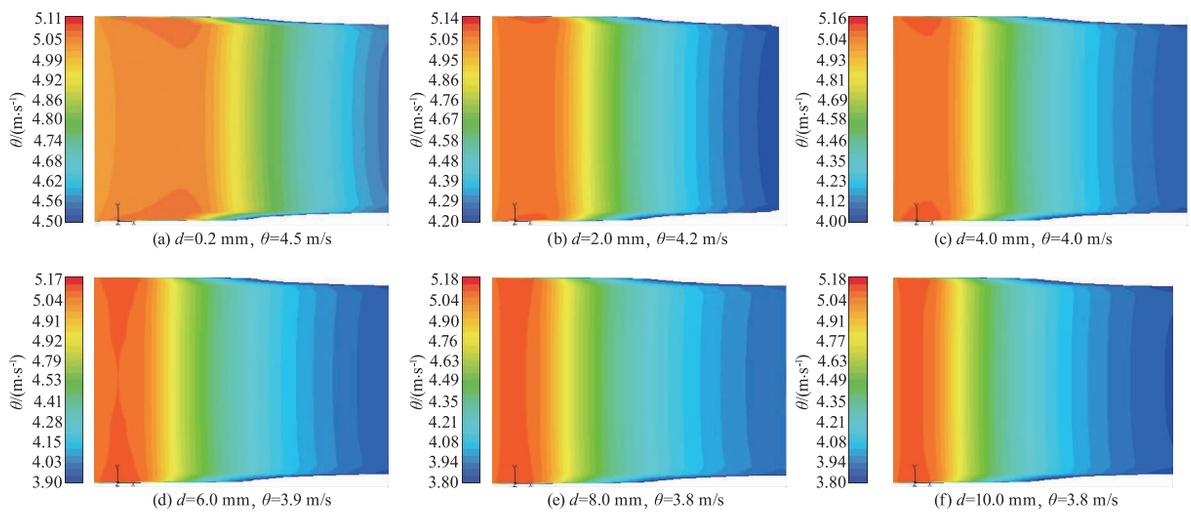


图 2 距地面 20 cm 处风速分布图

Fig. 2 Wind velocity distribution at 20 cm height above ground

由图 2a－f 各图分析，从进口到出口颜色均由红变蓝，说明风速随流经长度的增大而递减，与砂

石粒径大小无关；从图 2a，b 同断面定性分析，当粒径为 2.0 mm 时出口处的风速较 0.2 mm 小，逐一分析其余各图，可得粒径越大出口处的风速越小，由此表明，砂石覆盖可削减近地表风速，改善近地表风场，且风速随砂石粒径的增大而减小. 为了进一步定量研究砂石覆盖对近地表风场的影响，用削弱度反映砂石覆盖对近地表风速的削减程度，则

$$\eta_d = \frac{v_{0.2} - v_d}{v_{0.2}} \times 100\%, \tag{8}$$

式中：η_d 为砂石覆盖（粒径 d）对风速的削弱度；$v_{0.2}$ 为裸地风速；v_d 为砂石覆盖（粒径 d）的风速.

表 1 为进口风速为 5 m/s 时不同粒径砂石覆盖的出口风速，其中 Z 为距地面高度. 根据表 1 可得不同粒径砂石覆盖对风速的削弱度，具体结果如表 2 所示.

表 1　不同粒径砂石覆盖的出口风速

Tab. 1　Outlet wind velocity at various gravel sizes

m/s

Z/cm	d/mm						
	0.2	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
10	4.13	3.72	3.51	3.41	3.34	3.27	3.26
20	4.55	4.21	4.04	3.94	3.89	3.84	3.83
30	4.83	4.52	4.37	4.29	4.25	4.20	4.20
40	5.03	4.77	4.63	4.56	4.52	4.47	4.47
50	5.09	4.97	4.85	4.79	4.75	4.71	4.71

表 2　不同粒径砂石覆盖对风速的削弱度

Tab. 2　Degree of reduction of wind velocity at different gravel sizes

%

Z/cm	d/mm					
	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
10	9.93	15.01	17.43	19.13	20.82	21.07
20	7.47	11.21	13.41	14.51	15.60	15.82
30	6.42	9.52	11.18	12.01	13.04	13.04
40	5.17	7.95	9.34	10.14	11.13	11.13
50	2.36	4.72	5.89	6.68	7.47	7.47

观察表 1，裸地 Z 为 40，50 cm 的出口风速略大于 5 m/s，覆盖砂石后出口风速均小于 5 m/s，说明砂石覆盖可削减近地表风速，改善近地表风场. 由表 2 可知，同一砂石粒径下，削弱度随距地面高度的增大而减小. 同一高度下，削弱度随砂石粒径大小而变，粒径越大削弱度越大，当砂石粒径由 10.0 mm 变为 12.0 mm，距地面高度为 10 cm 时较 20 cm 时削弱度变化微弱，距地面高度为 30 ~ 50 cm 时削弱度没有改变. 削弱度增幅随粒径增大而减小，以 Z = 20 cm 为例，粒径由 2.0 mm 增大到 4.0 mm 时削弱度增大 50.07%，增幅较大，粒径由 8.0 mm 增大到 10.0 mm 时削弱度增大仅 7.51%，增幅较小. 由此表明，当粒径小于 10.0 mm 时可通过增大砂石粒径来削减风速，当粒径大于 10 mm 时粒径大小对风速的削弱度基本不变；而削弱度增幅随粒径增大而减小.

2.2　风速为 13 m/s 时砂石覆盖的影响

表 3 为进口风速为 13 m/s 时不同粒径砂石覆盖的出口风速，根据表 3 可得不同粒径砂石覆盖对风速的削弱度，见表 4.

表 3　不同粒径砂石覆盖的出口风速

Tab. 3　Outlet wind velocity at different gravel sizes

m/s

Z/cm	d/mm						
	0.2	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
10	10.79	9.49	9.10	8.85	8.66	8.50	8.48
20	11.87	10.78	10.46	10.26	10.09	9.96	9.95
30	12.57	11.63	11.33	11.15	11.00	10.88	10.87
40	13.08	12.29	12.03	11.85	11.72	11.61	11.61
50	13.21	12.82	12.58	12.43	12.32	12.22	12.22

表 4　不同粒径砂石覆盖对风速的削弱度

Tab. 4　Degree of reduction of wind velocity at different gravel sizes

%

Z/cm	d/mm					
	2.0	4.0	6.0	8.0	10.0	12.0
10	12.05	15.66	17.98	19.74	21.22	21.41
20	9.18	11.88	13.56	15.00	16.09	16.18
30	7.48	9.86	11.30	12.49	13.44	13.52
40	6.04	8.03	9.40	10.40	11.24	11.24
50	2.95	4.77	5.90	6.74	7.49	7.49

由表 4 分析可得出与表 2 相同的结论. 相异之处在于，同一粒径同一高度下风速大较风速小的削弱度略有增大，但相差不明显.

2.3　砂石覆盖对近地表风场影响的实测值

通过现场观测对模拟结果进行验证，用国产 BENETECH - GM8901 风速仪对景泰典型压砂地（粒径大于 10.0 mm 砂石体积质量为 98%）和裸地分别进行的 3 次最大平均风速观测，用最大平均风速变异系数来检验观测数据是否存在偶然性，并计算其削弱度如表 5 所示.

从表 5 可以看出，最大平均风速变异系数均很小，仅占 2.24%. 对比表 5 与表 2 可知，模拟所得削弱度较实测相近，在 Z = 10 cm 处削弱度模拟值为 21.07%，较实测值 23.48% 精度为 89.7%，当 Z 为 20，30，40，50 cm 处模拟精度分别为 89.5%，91.9%，98.3%，92.6%；同理，对比表 5 与表 4，当 Z 为 10，20，30，40，50 cm 处模拟精度分别为 91.2%，91.6%，95.3%，99.3%，92.8%. 说明模拟精度均在

89%以上,故可用CFD方法较准确地模拟砂石覆盖对近地表风场的影响.

表5 压砂地和裸地观测的最大平均风速及削弱度

Tab.5 Observed maximum average wind speed and its degree of reduction in bare and gravel-covered lands

Z/cm	裸地						压砂地						
	θ_{max1}/(m·s^{-1})	θ_{max2}/(m·s^{-1})	θ_{max3}/(m·s^{-1})	$\bar{\theta}_{max}$/(m·s^{-1})	σ	C_v/%	θ_{max1}/(m·s^{-1})	θ_{max2}/(m·s^{-1})	θ_{max3}/(m·s^{-1})	$\bar{\theta}_{max}$/(m·s^{-1})	σ	C_v/%	η_d/%
10	8.3	8.0	8.4	8.23	0.17	2.06	6.2	6.2	6.5	6.30	0.14	2.24	23.48
20	9.7	9.2	9.4	9.43	0.21	2.18	7.7	8.0	7.6	7.77	0.17	2.19	17.67
30	10.0	9.9	10.4	10.10	0.22	2.14	8.8	8.5	8.7	8.67	0.12	1.44	14.19
40	10.5	10.7	10.6	10.60	0.08	0.77	9.5	9.2	9.5	9.40	0.14	1.50	11.32
50	10.7	10.9	10.6	10.73	0.12	1.16	9.8	9.7	10.1	9.87	0.17	1.72	8.07

3 结 论

砂石覆盖可有效削减近地表风速,抑制土壤风蚀和蒸发,增加水分入渗,提高作物产量.文中基于CFD方法,模拟了砂石覆盖的抗风蚀效应,分析了砂石粒径对近地表风场的影响,并通过现场测试进行了验证,得出以下结论:

1)风速随流经长度的增大而递减,与砂石粒径大小无关;同断面定性分析,粒径越大出口处的风速越小,由此表明,砂石覆盖可削减近地表风速,改善近地表风场,且风速随砂石粒径的增大而减小.

2)同一砂石粒径下,削弱度随距地面高度的增大而减小.同一高度下,削弱度随砂石粒径增大而增大,当砂石粒径由10.0 mm变为12.0 mm,距地面高度为10 cm和20 cm时削弱度变化微弱,距地面高度为30~50 cm时削弱度没有改变.由此表明,当粒径小于10.0 mm时可通过增大砂石粒径削减风速,当粒径大于10.0 mm时粒径大小对风速的削弱度基本不变;削弱度增幅随粒径增大而减小.而农业生产实际中,覆盖的砂石颗粒并不均匀,具有一定级配,比单一粒径更具稳定性和抗风蚀性.

3)同一粒径同一高度下大风日年平均风速较有风日年平均风速削弱度略有增大,但差别不明显.通过现场观测砂石覆盖对近地表风场的影响,模拟得到的削弱度较实测所得砂石覆盖对近地表风场削弱度相近,模拟精度可达89%以上.

参考文献(References)

[1] 陈智,麻硕士,赵永来,等.保护性耕作农田地表风沙流特性[J].农业工程学报,2010,26(1):118-122.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Zhao Yonglai, et al. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field [J]. Transactions of the CSAE, 2010,26(1):118-122. (in Chinese)

[2] 李晓丽,申向东,解卫东.土壤风蚀物中沙粒的动力学特性分析[J].农业工程学报,2009,25(6):71-75.
Li Xiaoli, Shen Xiangdong, Xie Weidong. Analysis of dynamic characteristics of sand grains in wind erosion soil[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(6):71-75. (in Chinese)

[3] 冯晓静,高焕文,李洪文,等.北方农牧交错带风蚀对农田土壤特性的影响[J].农业机械学报,2007,38(5):51-54.
Feng Xiaojing, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Effect of wind erosion in agro-pastoral regions on soil characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2007,38(5):51-54. (in Chinese)

[4] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1993,17(1):50-68.

[5] Hupy Joseph P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate[J]. Journal of Arid Environments, 2004,58(2):167-179.

[6] 赵永来,陈智,孙悦超,等.作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J].农业机械学报,2011,42(6):38-42.
Zhao Yonglai, Chen Zhi, Sun Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agriculture Machinery, 2011,42(6):38-42. (in Chinese)

[7] 赵沛义,妥德宝,李焕春,等.带田残茬带宽度及高度对土壤风蚀模数影响的风洞试验[J].农业工程学报,2011,27(11):206-210.

(下转第270页)