铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算

丁录胜[1]，程建军[2]，陈柏羽[2]，葛 云[3]，丁泊淞[2]

（1. 中铁一院新疆铁道勘察设计院有限公司，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003；3. 石河子大学 机械电气工程学院，新疆 石河子 832003）

摘 要：[目的] 调查在建库格铁路沿线布设的高立式芦苇沙障的阻沙与防风效果，判断高立式芦苇沙障能否满足防风阻沙的工程需要，为风沙灾害防治提供相关的科学依据。[方法] 在沿线试验段进行了高立式芦苇沙障的阻沙率测试与梯度风监测，并采用数值模拟计算手段深入分析了高立式芦苇沙障的流场分布特征以及阻沙控沙规律。[结果] ①现场测试发现单道芦苇沙障的阻沙率为 93.85%，铁路沿线通常设置多道阻沙沙障，风沙流经过多道阻沙沙障后，基本被净化。②在单道芦苇沙障的作用下，风沙流在其周围的速度分布明显，沙障后形成的减速区较为均匀且没有涡流区的出现；芦苇沙障芦苇束的透隙率为 36.5%，对风沙流的削弱影响区主要分布在沙障前 3.5H(H=200 cm)和沙障后 17H 水平距离范围内，对来流的平均削弱程度为 29.7%，最大值为 48%。③当风速超过沙粒起动风速后，风沙颗粒主要分布在芦苇沙障前 0.2H 范围内，风沙流经过沙障后沙通量急剧降低。[结论] 通过现场试验及数值模拟，揭示了高立式芦苇沙障的阻沙控沙规律。高立式芦苇沙障具有类似网式沙障的优良控沙能力，可在铁路沿线进行推广使用。

关键词：现场测试；数值计算；芦苇沙障；阻沙率；控风特征

文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2019)03-0156-07 **中图分类号**：U216.41+3

文献参数：丁录胜，程建军，陈柏羽，等. 铁路高立式芦苇沙障防风阻沙的现场测试与流场模拟计算[J]. 水土保持通报，2019，39(3)：156-162. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.026；Ding Lusheng，Cheng Jianjun，Chen Boyu，et al. Field test and numerical simulation of windbreak and sand-resisting on high-parallel reed sand-barriers along railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2019，39(3)：156-162.

Field Test and Numerical Simulation of Windbreak and Sand-resisting on High-parallel Reed Sand-barriers Along Railway

Ding Lusheng[1], Cheng Jianjun[2], Chen Boyu[2], Ge Yun[3], Ding Bosong[2]

(1. *Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co. Ltd*, *Urumqi*, *Xinjiang* 830011, *China*; 2. *College of Water Resources and Architectural Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832003, *China*; 3. *College of Mechanical and Electric Engineering*, *Shihezi University*, *Shihezi*, *Xinjiang* 832003, *China*)

Abstract: [Objective] The sand blocking and windproof effects of high-parallel reed sand-barriers along the Korla-Golmud railway were investigated, and whether the high-parallel reed sand barrier can meet the engineering needs of wind and sand resistance was judged, in order to provide a scientific basis for sand-wind disaster prevention. [Methods] The sand blocking rate test and gradient wind monitoring of the high-parallel reed sand-barriers were conducted in the test section along the line. Numerical simulation calculations were used to analyze the flow field distribution characteristics and sand control laws of high-parallel reed sand-barriers. [Results] ① The sand-blocking rate of single-channel reed sand barrier was 93.85%. Multiple sand barriers were usually set along the railway line. The sand flow was basically cleared after passing through multiple sand barriers. ② Under the action of single reed sand barrier, the velocity distribution around the barrier

收稿日期：2018-11-06 **修回日期**：2018-12-10

资助项目：国家自然科学基金项目“铁路沿线网(孔板)式沙障风沙流场测试及其支撑体系受力特征研究”(51641808)，“铁路沿线沙障与风沙流场互馈机制及防沙工程系统控沙原理研究”(51568057)，“新疆戈壁、荒漠强风区铁路沿线积沙分布迁移规律及挡风沙构筑物优化设计与合理组配模式研究”，(50908152) “戈壁近地表强风携沙砾运动的力学特性研究”(51268050)

第一作者：丁录胜(1965—)，男(汉族)，高级工程师，总工程师，从事铁路路基及风沙防治的设计实践工作。E-mail：549756003@qq.com。

通讯作者：程建军(1979—)，男(汉族)，博士，教授，博士研究生导师，主要从事铁路防沙科研工作。E-mail：chengdesign@126.com。

was obvious, and the deceleration zone formed behind the barrier was more uniform and there was no eddy current zone. The porosity of reed sand barrier was 36.5%. The weakening impact zone of the reed sand barrier on the inflow was mainly within the range of $3.5H$ (H=200 cm) before the barrier and $17H$ after the barrier. The mean weakening capacity for the incoming flow was 29.7% and the maximum value was 48%. ③ When the wind speed exceed 6 m/s, the sand particles were mainly distributed within the 0.2H range before the reed sand barrier, and the sand flux decreased sharply after the sand flow passed through the sand barrier. [Conclusion] Through the field experiment and numerical simulation, the law of sand control of high-parallel reed sand-barrier is revealed. The high-parallel reed sand-barrier has excellent sand control capacity similar to the net sand barrier and can be used along the railway.

Keywords: field test; numerical calculation; reed sand barrier; sand blocking rate; wind control characteristics

风沙灾害防治一直是中国西部戈壁、沙漠地区铁路建设与运营期所面对的棘手工程技术问题,铁路沿线风沙治理通常有机械防沙、植物防沙以及化学防沙3类形式。其中机械防沙是最有效,也是最快捷的方式。但机械防沙由于工程量巨大,且因防沙材料与种类的选择,关系到其使用寿命问题[1]。目前在铁路沿线所采用的机械防沙主要有混凝土式、PE网式以及其它形式的土工材料[2]。在铁路沿线整个防沙工程体系中,位于最前沿的高立式阻沙沙障其作用最重要,目前在建库格铁路沿线高立式阻沙沙障采用芦苇沙障为主要沙障形式之一。

芦苇沙障因为具有造价低,来源广泛、就地取材、施工便捷、后期更替修补方便等特点被列为库格铁路沿线高立式阻沙沙障所采用的主要防护形式之一,然而对于采用芦苇沙障进行风沙防护的研究较少,韩致文等[3]对不同间距芦苇方格进行风洞试验发现,风速最大值出现在芦苇方格迎风侧第一格的上空,且方格内积沙均匀。马学喜等[4]通过野外实地观测发现,在不同地形条件下芦苇方格沙害类型均表现为半埋危害。这些研究仅针对低立式芦苇方格进行了初步研究,而针对高立式芦苇沙障的防沙的文献尚未见到报道,高立式芦苇沙障设置高度为2 m,芦苇采用质地优良水生干芦苇,用镀锌铁丝捆扎成直径为8 cm的芦苇束,芦苇束间距为5 cm,每隔2 m设置圆木立柱,立柱直径15 cm,根部埋入地基中不少于1m。为了调查高立式芦苇沙障的防风阻沙性能以及芦苇沙障的流场分布特征,本文采用铁路沿线的阻沙现场测试以及流体动力学数值计算手段对高立式芦苇沙障阻沙防风性能进行研究,以期为风沙灾害防治提供相关的科学依据。

1　高立式芦苇沙障阻沙现场测试试验设计及数值模拟方法

1.1　阻沙现场测试试验

为了调查高立式芦苇作为阻沙沙障的防风阻沙性能,在库格铁路沿线进行了芦苇沙障的阻沙测试试验与防风测试试验。试验在芦苇沙障的迎风侧50 m范围之外布设第一套风沙采集系统,风沙采集系统由1 m高的地表集沙仪与3 m高的梯度风速仪组成。其中地表集沙仪采集高度范围为1 m,50个高度层次,每2 cm为一个采集高度。当有风沙来流时,需要人工调整方向,使来流对准采集口。梯度风速仪为4档高度,分别为0.2,0.8,2,3 m。此套风沙采集系统所得数据为风沙来流参照值。第2道风沙采集系统布设在芦苇沙障的背风侧沙障防风影响范围之外,通过2套采集系统的对照,能摸清芦苇沙障截留的过境风沙流,用阻沙率及大风遮蔽效应系数表示芦苇沙障的防风阻沙性能[5]。

1.2　风沙流场数值模拟方法

1.2.1　几何建模　利用AutoCAD建立计算区域模型。芦苇沙障模型的计算域长80 m,宽6 m,高20 m,计算域尺寸的选取主要考虑计算对象阻塞率的要求,为使模型阻塞率小于6%,取计算域高度为$10H$(H为芦苇沙障的高度,文中取H=200 cm)。芦苇沙障每隔2 m设置一个直径15 cm的立柱,研究对象取具有对称性的3段芦苇沙障,总长6 m,故计算域宽取6 m;为满足气流在芦苇沙障附近充分发展的条件,将芦苇沙障布设在距计算域入口$10H$位置处,沙障后保留$30H$的距离以分析气流在其后的发展情况,故计算域长度取80 m。本文中以直径为8 cm的圆柱体代替实际防风沙工程中的芦苇束,为考虑芦苇沙障稳定性设备如捆绑铁丝等对气流的影响,在芦苇束高度方向上每隔30 cm设置一长6 m,直径为0.2 cm的圆柱体。为尽可能真实的反映实际工程阻沙芦苇沙障的阻沙效果,设置芦苇束间距均为5 cm。

1.2.2　网格划分　采用ANSYS ICEM CFD的Meshing模块对建立的几何模型和计算域进行网格划分,采用非结构化四面体网格(TETRAHEDRONS)划分方法并设定合适的网格尺寸,其中网格

节点(Nodes)176 435 个、网格面(Faces)1 973 444 个、网格单元(Cells)969 777 个,计算域模型网格平均质量为 0.837,网格质量优良。

1.2.3 计算参数设置 为从沙粒的起动风速方面考虑沙粒在芦苇沙障附近的沉积分布,分别进行流场和风沙两相流的数值计算。流场的数值计算过程较为简便,主要涉及入口廓线风速的设定,对于两相流计算参数设定,为体现自然工况下沙源充分的情况,模拟中采用风携沙模型计算芦苇沙障作用下积沙分布规律,即在考虑风沙流自平衡机制下,在计算域入口处设置源源不断的沙粒。设置求解器为能反映风沙两相流的瞬间变化的瞬态、基于压力的求解方式,其中压力—速度耦合方法选择用于求解不可压缩流场的相间压力耦合方程的半隐方法(Phase Coupled SIMPLE),湍流模型选择对边界层湍流方程进行改进的可实现 k-ε 模型(Realizablek-ε 模型)。由于该部分涉及风沙两相流问题,定义沙颗粒密度和粘度分别为 $\rho_s=2\ 600\ kg/m^3$,$\mu=0.004\ 7\ kg/(m\cdot s)$,并在沙相属性中选择沙物质形状为颗粒状,根据沙物质不同粒径下的运移方式定义沙颗粒直径 $d_s=0.1\ mm$[6];为保证计算结果能够收敛,动量、各相体积分数、湍动能以及湍流耗散率等的空间离散化方式均选择一阶迎风格式,并保证残差监视的绝对收敛标准不大于 10^{-3}。

设置模型入口为风沙流的速度入口,分别设定为 6,12,20,25 m/s,通过定义地表粗糙度来实现风沙流速度在不同高度上的分布规律,由于采用风携沙模型,沙相的体积分数设置考虑当颗粒的容积份额小于 5%时,颗粒的自由沉降就会受阻,并且自由沉降速度也不再遵循斯托克斯定律[6]。因此根据多次数值模拟结果,并考虑提供合适的沙源而设置入口沙相体积分数为 10%;计算域出口由于无法预测风沙流的湍流发展情况,故采用压力出口边界条件,湍流具体表示方法选择湍流强度和水力直径来描述,并根据模型尺寸分别定义两者为 5%和 4.6 m。计算域左右两侧采用对称边界条件,上边界采用滑移壁面条件,地面采用无滑移壁面条件(Wall)[7],根据实测梯度风速数据根据公式(2)所得的地表粗糙度来进行设定,模拟计算时间统一为 30 s。

2 结果与分析

2.1 阻沙现场试验结果

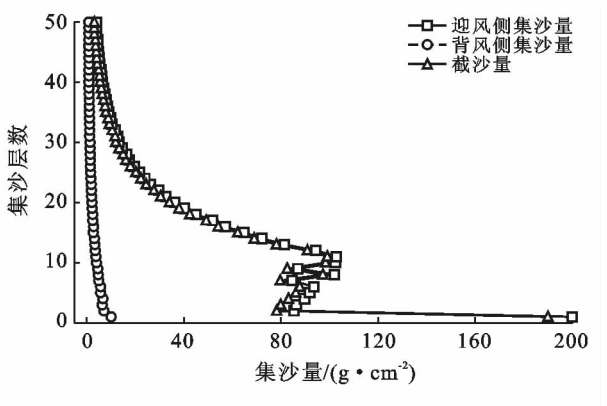
在高立式芦苇沙障前后同时布设风沙采集系统,一场大风后,记录分析布设在沙障前后的集沙仪集沙量。从图 1 可见,库格沿线沙漠边缘风沙来流的风沙流结构特征表现为沙通量主要在 1 m 高度范围以下,这与戈壁地表的风沙流运动规律有所不同[8],且贴近地表输沙量最大,在 20 cm 以下是输沙量的主体部分,20 cm 高度以上输沙量呈规律性的逐渐递减。由于沙障迎风侧的集沙仪采集的沙量是自然地表未经扰动的过境风沙流量,而沙障后的集沙仪采集的沙量是经过了芦苇沙障降速风沙流卸载后的过境风沙流。则沙障阻沙率的公式如下[5]:

$$K=\frac{Q_1-Q_2}{Q_1}\times 100\% \tag{1}$$

式中:K——阻沙率(%);Q_1——不受沙障影响的来流总过境风沙流量值(g/min);Q_2——经过沙障过滤后不能被截留的过境风沙流量值(g/min);具体测试时,Q_1 的量值来自布设在芦苇沙障迎风侧 $10H$(H 为芦苇沙障高度)以外,考虑到透隙式沙障的控风影响范围在沙障背风侧的距离为 $10\sim20H$ 左右,Q_2 的量值来自布设在沙障背风侧 $25H$ 距离处的集沙仪。将本次测试的数值带入(1)式得:

$$K=\frac{2\ 023.47-1\ 899.05}{2\ 023.47}\times 100\%=93.85\%$$

即第一道高立式芦苇沙障的阻沙率为 93.85%。



注:集沙层每层厚度为 2 cm。

图 1 高立式芦苇沙障沙障前后集沙量对比

图 2 为梯度风速仪实测的来流风速廓线,通过在芦苇沙障前后布设多套梯度风速仪,在有风时同时监测,能够采集大风经过沙障的流场风速变化数据,但是由于沙障对流场的扰动,沙障背风侧风速变化大,仅靠几套梯度风速仪难以捕捉到整个流场的风速变化规律。但是沙障迎风侧布设的梯度风速仪所采集的风速数据仍然具有重要的作用。根据普朗特—冯·卡门的速度对数分布规律,可利用任何 2 层风速量值来求取地表粗糙系数 z_0,地表粗糙系数是风速为零的高度(m),在后续的数值计算中是一个必须的参数。根据两层风速推求地表粗糙系数的公式如下:

$$u_{x_2}=u_{x_1}\ln\frac{z_2}{z_0}/\ln\frac{z_1}{z_0} \tag{2}$$

式中:u_{x_2},u_{x_1}——高度为 z_2 与 z_1 高度处的风速值,未知数是 Z_0,因此该公式可以进一步表示为:

$$z_0=e\left\{\left(\frac{u_{x_2}}{u_{x_1}}\ln z_1-\ln z_2\right)/\left(\frac{u_{x_2}}{u_{x_1}}-1\right)\right\} \tag{3}$$

将本次采用梯度风速仪监测所得同一时间的 2 个梯度风速值代入(3)式,即可得到该地域的地表粗糙度,为后续计算提供依据。

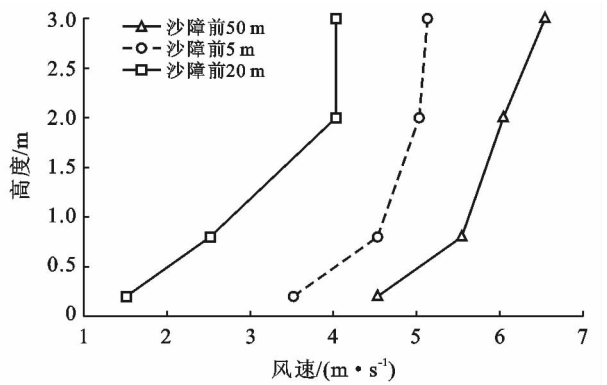
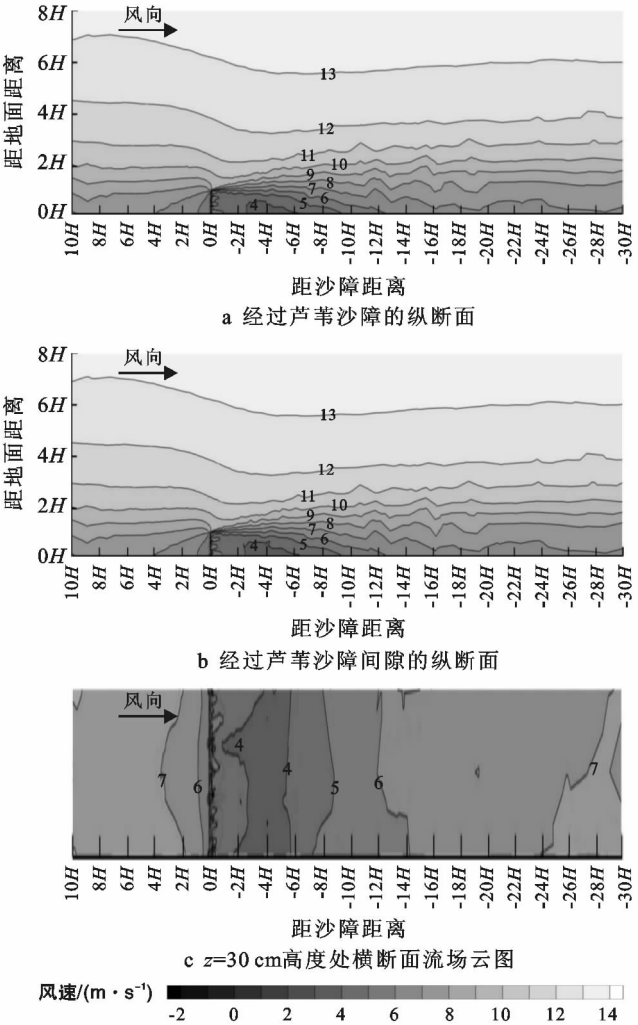


图 2　沙障迎风侧风速廓线

2.2　数值模拟结果

2.2.1　*芦苇沙障的流场分布及防风效益*　由于 2 种入口风速下,芦苇沙障附近流场分布相似,故该部分主要提取 12 m/s 入口风速下的计算结果具体分析芦苇沙障附近不同位置处的流场变化规律(如图 3 所示)。

从图 3 中可以看出,12 m/s 的入口风速下,芦苇沙障周围流场变化明显,经过芦苇的纵断面上流场分布规律与经过芦苇间隙的纵断面上流场的分布规律相似,主要是因为芦苇沙障间隙相对于芦苇沙障来说属于次要因素,对气流的干扰在宏观上的体现微弱[9]。图 3a 中,入口廓线风速在经过芦苇沙障时,由于实体芦苇对来流的阻碍,气流在障前约 3.97H 范围内出现减速区;芦苇沙障等间距布设存在的空隙,透隙率为 36.5%,使得因芦苇和其他气流团的挤压而从芦苇沙障顶部越过的气流较少,故在芦苇沙障顶部偏后方位出现的挤压上扬区范围小,湍流强度弱;气流在芦苇沙障后形成的减速区较为均匀,且没有涡流区的出现。图 3b 的流场分布规律在整体上与图 3a 的相似,局部区域的速度变化将在图 4 中分析,而从 z=30 cm 高度上的速度分布云图可以看出,气流得到较大程度的削弱区间在障后 1.8H～5.7H 内,其他区域的风速值仍大于 4 m/s,即沙粒仍具有一定的动能保持运动状态;从图 3c 中还可以看出,芦苇沙障对来流的干扰作用分布于芦苇沙障的整个布设长度。



注:H 为芦苇沙障高度,H=200 cm,下同。

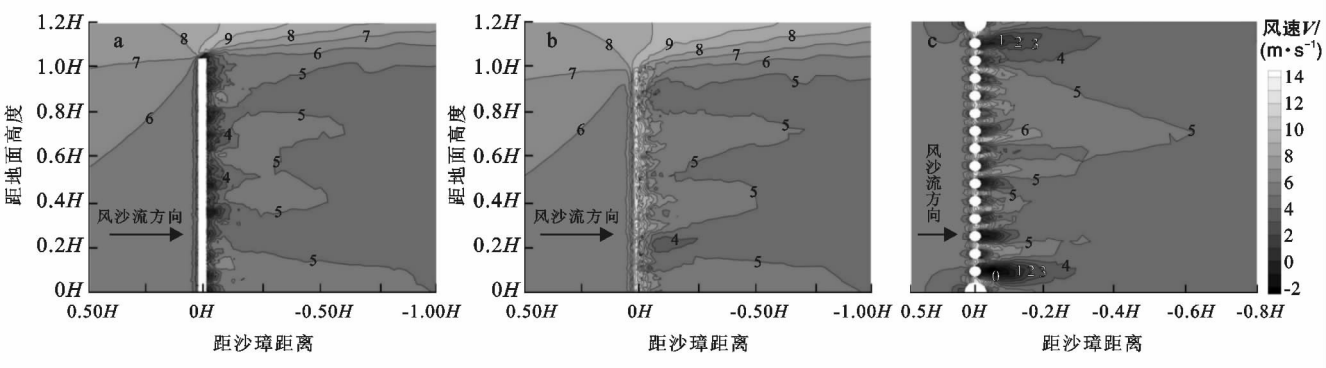
图 3　芦苇沙障不同断面的流场分布云图

从图 4 中可以看出不同断面上局部位置处流场分布的差异性。在图 4a 中,由于芦苇束的阻碍作用,气流仅在每株芦苇束后形成贴近芦苇束的微小离散涡流单元,涡流区单元微小,气流通过沙障后则不存在大的涡流区;图 4b 中,由于所选取纵断面经过两束芦苇之间空隙,该部分气流因受到两侧芦苇束的挤压而出现速度增加的紊流区,速度变化梯度较大;图 4c 中可以明显看出芦苇束和芦苇束之间气流的交替变化,由于两侧立柱离最近的芦苇束只有 40 mm 的距离,小于芦苇束之间的间距 50 mm,所以在两侧立柱附近出现与芦苇沙障后不同的流场分布规律。

采用风速遮蔽效应系数计算公式来计算芦苇沙障的防风效益:

$$\eta=(v_0-v_x)/v_0 \tag{4}$$

式中:η——风速遮蔽效应系数;v_0——入口风速(m/s);v_x——芦苇沙障前后 x 位置处的风速(m/s)。取 z=0.3,1.0,2.0 m 这 3 个特征高度处中心纵断面上的速度值进行数值分析,得到相应的遮蔽效应系数特征(如图 5 所示)。



注:图 a 和 b 为芦苇沙障前 0.5H 至障后 1H 范围内 1.2H 高度内的风速云图;图 c 为芦苇沙障前 0.2H 至障后 0.8H 范围内局部风速云图

图 4 芦苇沙障周围风速特征云图

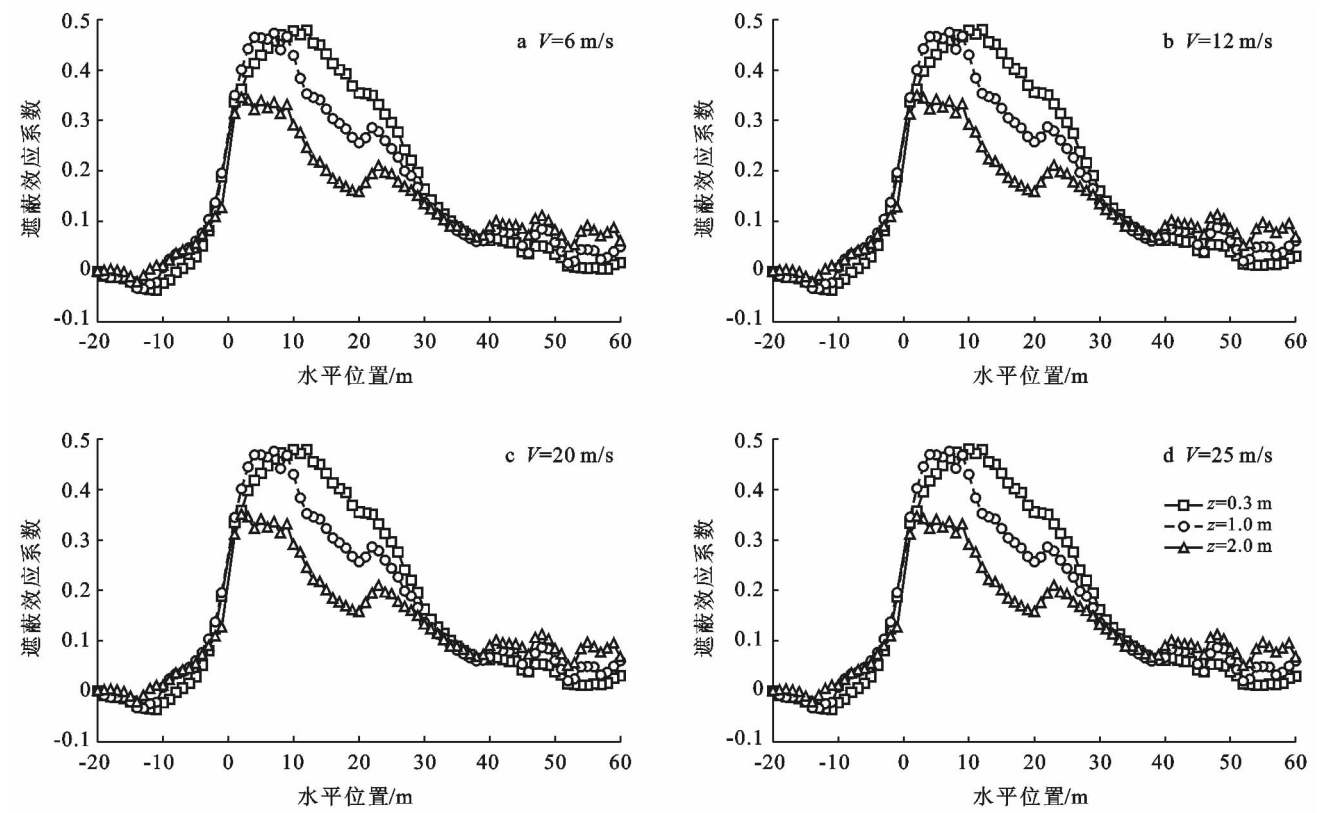


图 5 不同风速(V)时遮蔽效应系数特征

从图 5 中可以看出,不同高度处中心纵断面上风速的遮蔽效益系数随水平距离的变化趋势与入口风速的大小无关[10],即特定的防风沙构筑物对气流的控制规律相同,不受风速影响。图 5a 中,由于风沙两相流中,沙颗粒主要在离地面 30 cm 范围内运动,故该部分选择 Z=0.3 m 高度处风速值,分析其对沙粒运动的影响。在该高度上,风速的遮蔽效应系数呈现先增大后减小而后稳定的变化趋势。在计算域入口至芦苇沙障区间内,由于受到芦苇沙障的阻碍和因阻碍而湍动能降低的气流团的影响,气流速度呈现先增加后减小的变化趋势,即遮蔽效应系数先减小后增大;随着水平距离的增加,气流在芦苇沙障的作用下将不断得到削弱,即遮蔽效应系数从芦苇沙障位置处向后逐渐增大并达到最值 47.9%,该位置位于芦苇沙障后 6H 附近;随着水平距离的增加,芦苇沙障的影响逐渐减小,障后气流速度逐渐得到恢复,遮蔽效应系数逐渐减小,在障后 17H 处,气流已基本恢复至与入口相同的湍动能,而后将保持不变。其中在障前 3.5H 和障后 17H 的主要影响区间内,芦苇沙障对来流的平均削弱能力为 29.7%。z=1.0 m 高度上和 z=2.0 m 高度上风速的遮蔽效应系数变化趋势相似,仅在芦苇沙障后 1~30 m 范围内,z=2.0 m 高度上风速的遮蔽效应系数比 z=1.0 m 高度上的整体上下降了 29.1%。

2.2.2　*芦苇沙障的积沙分布与控沙特征*　如图 6 所示,随着入口风速的增加,沙粒在芦苇沙障附近的沉积分布规律相似,均集中分布在芦苇沙障前,障后沙粒的分布相对较少且较为均匀,只是不同的入口风速下对应的沙粒沉积分布区的沙相体积分数有所不同。图 6a 中,由于入口风沙流速较小仅有 6 m/s,比直径为 0.1 mm 的沙粒对应的的起动风速 4 m/s 略大,加之芦苇沙障对来流平均 29.7%的削弱作用,使得风沙流的湍动能得到一定程度的削减后其速度值接近并低于沙粒的起动风速,所以沙粒在障前 0.2H 范围内出现大量的沉积,沙相体积分数达最大值 60%。障后,由于芦苇沙障竖向均匀透隙存在,使得未经削弱的风沙流在障后不断缓和湍动能偏小的风沙流,从而导致沙粒的沉积量减小[11]。

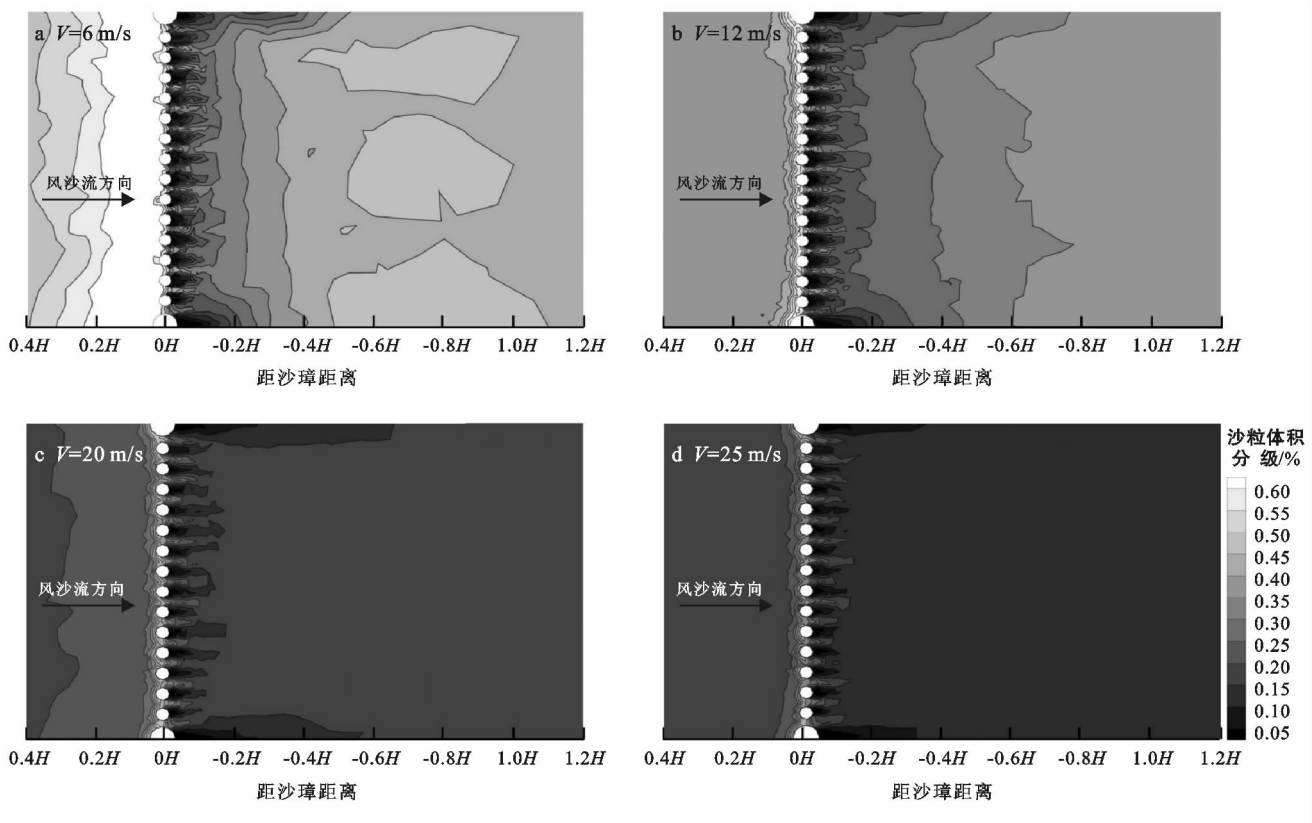


图 6　不同风速(V)时芦苇沙障周围的积沙分布特征

为分析芦苇沙障对过境风沙流的控制作用,尤其是在沙障障后减速区范围内沙颗粒物质的沉积与运动规律,参考流场分布特点,提取芦苇沙障前 3.5H 至障后 17H 范围内的沙粒质量流率以定量分析芦苇沙障的控沙特点,其中沙相质量流率为单位时间内通过计算域目标截面的沙粒质量。结果如图 7 所示。

从图 7 中可以看出,在不同的入口风沙流速下,芦苇沙障前 3.5H 至障后 17H 范围内的沙粒质量流率变化有一定的差异性,在水平距离 X=14～19 m (X=20 m 为芦苇沙障的布设位置)范围内保持稳定;越过芦苇沙障后,沙通量急剧减小,在 X=20～54 m 范围内波动差异大,这种波动正是由于沙障对障后风沙流场的扰动所造成的,但该区间内沙粒质量流率明显小于芦苇沙障前 7 m 范围内的沙通量,这种变化趋势与沙粒的沉积分布情况是吻合的。

3　结 论

针对在建库格铁路沿线大量使用的高立式芦苇沙障进行了现场测试与数值计算分析,采用高立式芦苇沙障作为阻沙沙障的系统研究尚未见文献论述,本文基于现场实测数据分析了芦苇沙障的阻沙性能、控风性能,流场分布以及整体控沙规律。通过研究发现在建库格铁路沿线采用的高立式芦苇沙障的阻沙效果明显,单道芦苇沙障的阻沙率为 93.85%,虽然当风级增大时,阻沙率会发生变化,但由于铁路沿线通常设置多道阻沙沙障,可以推测风沙流经过多道阻沙沙障后,基本被净化。

在单道芦苇沙障的作用下,来流在其周围的速度分布明显,障后形成的减速区较为均匀且没有涡流区的出现;芦苇沙障的透隙率为36.5%,芦苇沙障对来

流的削弱影响区主要在分布障前 3.5H 和障后 17H 水平距离范围内，对来流的平均削弱程度为 29.7%，最大值为 48%，对芦苇沙障风沙两相流的计算结果分析可知，当风速大于起沙风速后，沙颗粒主要分布在芦苇沙障前 0.2H 范围内，风沙流经过沙障后沙通量急剧降低。

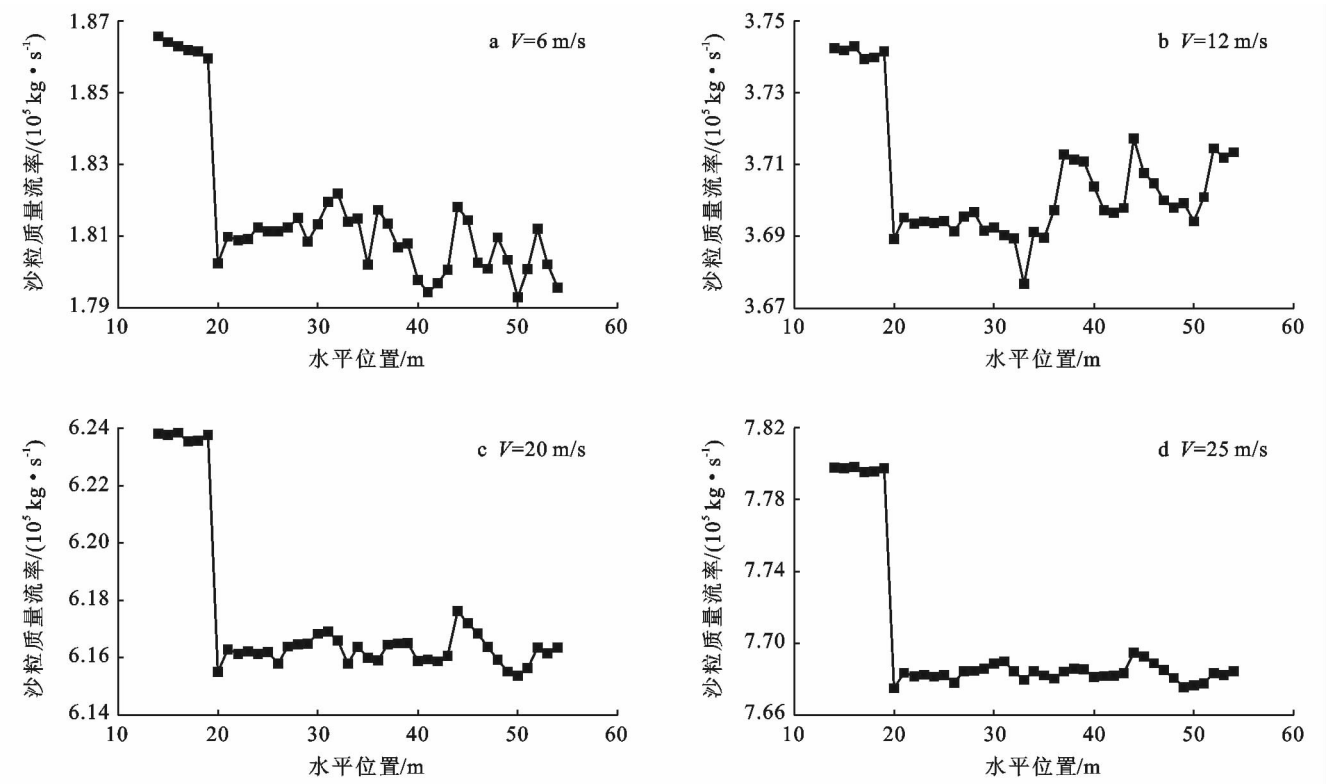


图 7 不同风速(V)时沙障前后减速区范围内沙粒质量流率变化特征

以上研究结果表明，高立式芦苇沙障对障前 3.5H和障后 17H 范围有较好遮蔽效果，可可为多道高立式芦苇沙障的合理布置间距提供参考，此外，高立式芦苇沙障具有类似网式沙障的优良控沙特征，也可为该型沙障在库格铁路沿线的推广使用提供理论依据。

[参 考 文 献]

[1] Zakeri J A. Investigation on railway track maintenance in sandy-dry areas [J]. Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance, 2012,8(2):135-140.

[2] Zakeri JA, Abbasi R. Field investigation of variation of loading pattern of concrete sleeper due to ballast sandy contamination in sandy desert areas[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012,26(12):3885-3892.

[3] 韩致文，刘贤万，姚正义，等. 复膜沙袋阻沙体与芦苇高立式方格沙障防沙机理风洞模拟试验[J]. 中国沙漠，2000,20(1):41-45.

[4] 马学喜，王海峰，李生宇，等. 两种固沙方格沙障的防护效益及地形适应性对比[J]. 水土保持通报，2015,35(3):344-349.

[5] Cheng Jianjun, Lei Jiaqiang, Li Shengyu, et al. Disturbance of the inclined inserting-type sand fence to wind-sand flow fields and its sand control characteristics [J]. Aeolian Research, 2016,21:139-150.

[6] Cheng Jianjun, Xin Guowei, Zhi Lingyan, et al. Unloading characteristics of sand-drift in wind-shallow areas along railway and the effect of sand removal by force of wind [J]. Scientific Reports, 2017,7:1-11.

[7] 辛国伟，程建军，王连，等. 铁路沿线地表条件与风沙流场的互馈规律研究[J]. 铁道标准设计，2016,60(9):22-27.

[8] Cheng Jianjun, Jiang Fuqiang, Xue Chunxiao, et al. Characteristics of the disastrous wind-sand environment along railways in the Gobi area of Xinjiang, China [J]. Atmospheric Environment, 2015,102:344-354.

[9] 李凯崇，薛春晓，刘贺业，等. 不同类型挡沙墙风沙防护机理的风洞试验研究[J]. 铁道工程学报，2015,32(1):17-21.

[10] 钟卫，刘涌江，杨涛. 3 种沙障防风固沙效益比较的风洞试验研究[J]. 水土保持学报，2008,22(6):7-12.

[11] 薄天利，郑晓静. 防沙栅栏风洞试验的数值模拟[J]. 兰州大学学报：自然科学版，2005,41(5):97-101.