沙漠地区三种风沙侧向输导工程的数值模拟

辛林桂，程建军，王 连，智凌岩，陈柏羽，王 瑞
（石河子大学 水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003）

摘 要：[目的] 研究沙漠地区交通线路周围侧向输导工程的风沙流场规律，为侧向输导工程的应用提供理论基础。[方法] 基于新疆维吾尔自治区哈密市了墩地区风信数据和 CFD 三维数值模拟，建立不同工况对 3 种侧向输导工程的风沙流场进行对比分析。[结果] 3 种侧向输导工程由于结构的不同，风沙流通过开放式羽毛排的排间间距进行侧向输导，封闭式羽毛排和一字排则在排前进行输导。3 种侧向输导工程流场作用区域都由输导区和减速区构成，但开放式羽毛排的减速区面积明显小于封闭式羽毛排和一字排。风速较大沙源丰富应使用一字排，风速较大沙源一般应使用开放式羽毛排，风速一般沙源丰富应使用封闭式羽毛排。[结论] 侧向输导工程可以对风沙流进行有效输导，不同类型的侧向输导结构适用于不同的工况。

关键词：风沙两相流；数值模拟；侧向输导工程；风沙堆积
文献标识码：B **文章编号**：1000-288X(2018)04-0195-07 **中图分类号**：U216.41+3

文献参数：辛林桂，程建军，王连，等. 沙漠地区三种风沙侧向输导工程的数值模拟[J]. 水土保持通报，2018，38(4)：195-201. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.032. Xin Lingui, Cheng Jianjun, Wang Lian, et al. Numerical simulation study on three kinds of wind and sand lateral transmission engineering along desert area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(4): 195-201.

Numerical Simulation Study on Three Kinds of Wind and Sand Lateral Transmission Engineering Along Desert Area

XIN Lingui, CHENG Jianjun, WANG Lian, ZHI Lingyan, CHEN Baiyu, WANG Rui
(*College of Water Resources and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang* 832003, *China*)

Abstract: [Objective] Studying the rules of wind and sand flow in lateral transport engineering around desert line to provide theoretical basis for the application of lateral transmission engineering. [Methods] Based on the wind data in the Liaodun area of Xinjiang Autonomous Region and 3D numerical simulation of CFD, the wind and sand flow fields of three lateral transmission engineerings were compared and analyzed under different working conditions. [Results] Due to the structure differences of lateral transportation engineering, wind and sand flow were guided laterally by the spacing of open feather-row, while closed feather-row and straight-row were conducted in front of the engineering. The flow field of three lateral transportation engineerings were all consist of the transportation area and the deceleration zone, but the deceleration zone area of open feather-row was less than those of the other two. Large wind speed and rich sand source should use straight-row engineering. Large wind speed and general sand source should use open feather-row engineering; general wind speed and rich sand source should use closed feather-row engineering. [Conclusion] Lateral transport engineering can effectively transport wind sand flow, and different types of lateral transportation structure are suitable for different conditions.

Keywords: **wind sand two-phase flow; numerical simulation; lateral transportation engineering; aeolian sand deposition**

收稿日期：2018-01-07 **修回日期**：2018-01-30
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”(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”(51268050)
第一作者：辛林桂(1994—)，男(汉族)，河南省新乡市人，硕士研究生，研究方向为沙害防治工程学。E-mail：957873457@qq.com。
通讯作者：程建军(1979—)，男(汉族)，河北省衡水市人，博士，教授，博士生导师，主要从事铁路风沙防治研究。E-mail：chengdesign@126.com。

中国西北地区包括陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区和新疆维吾尔自治区 5 个省、自治区，深居中国西北部内陆，属于温带大陆性气候，具有面积广大、干旱缺水、荒漠广布、风沙较多、生态脆弱、人口稀少、开发难度较大等特点[1-3]。随着经济水平的飞速提高致使交通线路产生了跨越式的发展，但是由于这些地区特殊的地理和气候环境，交通线路的运营不可避免的会遇到风沙运动的问题[4-6]。在风沙地区的沙障结构是通用的，包括固沙工程[7-9]、阻沙工程[10-14]、输导沙工程[15]。在单向风况条件下，当风力强劲，沙源丰富的情况下，单纯地采用阻、固沙措施虽能在短时间内控制沙害，但当沙障前积沙随时间急剧增加时，沙障阻沙功能衰退，会引发更大的沙害。因此，利用有利地形，借助风力采用输导措施比阻固沙更为合理、有效。目前，较为常见的输导沙工程有：羽毛排工程和一字排工程，其中羽毛排工程又根据来流不同的通过形式分为封闭式和开放式两种。输导沙工程在实际工程的使用中多是依据经验布置，并且国内外对不同输导措施的作用机理和输导理论的研究鲜有报道。

因此，本文以风信数据为基础，采取 CFD 数值模拟的方法，研究风速较大沙源丰富、风速较大沙源一般和风速一般沙源丰富等工况时不同侧向输导工程的风沙流场特征，为侧向输导工程的研究和使用提供理论基础。

1 数值模型建立

1.1 风信数据采集

本研究在位于新疆维吾尔自治区哈密市的百里风区了墩车站附近布设测点一个(简称了墩测点)，了墩站建于 1960 年，距离兰州火车站 1 455 km，距上行车站雅子泉火车站 29 km，距下行车站红层火车站 11 km，是百里风区的一个重要车站。在了墩站附近布设测点，对高度 2 m 处的风速风向情况进行了为期半年的监测，获得实测数据，对于掌握百里风区内的荒漠和戈壁地区的风速风向状况具有重大意义。图 1 为 2011 年 7—12 月了墩测点 2 m 高度处各月份最大风速玫瑰图，各月最大风速集中发生在 N，NNW 和 NW 方向，最大平均风速约为 20 m/s，其余各方向最大平均风速约为 10 m/s。

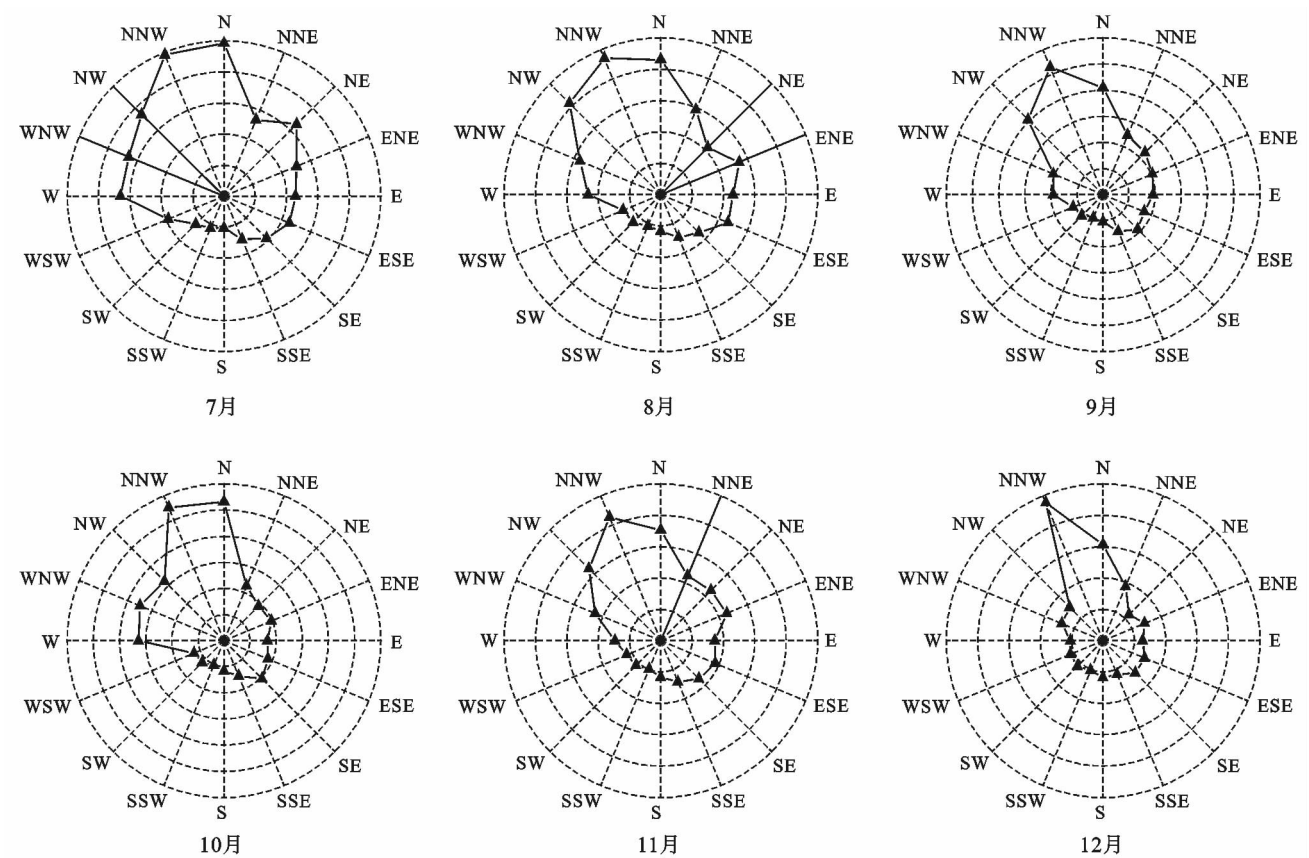


图 1 了墩测点 2 m 高度处最大风速(m/s)玫瑰图

1.2 试验设计

戈壁、荒漠地区以了墩地区为例，根据风速大小可以将风速较大时设置为 20 m/s，风速一般时 10 m/s，再由风携沙模型，根据沙源多少可以将沙源丰富时含沙量设置为 2%，沙源一般时含沙量设置为 1%，表 1 为不同工况时风速和含沙量的设置情况。本文针对

不同的风速条件及沙源情况,分为 3 种工况研究侧向 3 种输导工程的适用条件,封闭式羽毛排、开放式羽毛排和一字排的工程示意图如图 2 所示。

表 1　3 种工况的风速和含沙量

工况	风速/(m·s^{-1})	含沙量/%
风速较大沙源丰富	20	2
风速较大沙源一般	20	1
风速一般沙源丰富	10	2

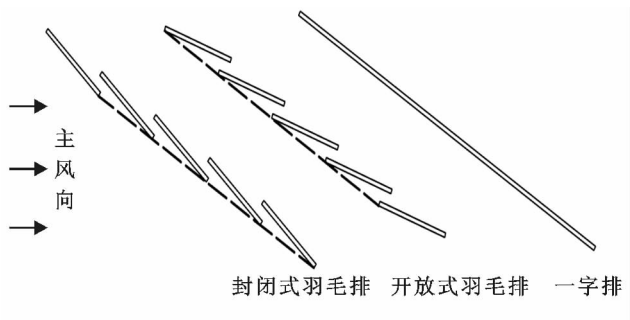


图 2　3 种侧向输导工程示意图

1.3　模型建立及参数设置

计算域尺寸为 150 m×30 m×20 m,3 种侧向输导工程的位置示意图如图 3 所示。组成封闭式羽毛排与开放式羽毛排工程的 5 片单片羽毛排尺寸为 4 m×2 m×0.2 m,各相邻单片羽毛排的间距和夹角均为 0.5 m,主排轴与风向的夹角为 30°;一字排高度为 2 m,厚度为 0.2 m,与风向的夹角为 30°,其在迎风面的投影长度与封闭式羽毛排相同。由于输导工程结构不对称,网格采用四面体网格划分,对地面及工程附近进行局部加密如图 3 所示,经计算检查后网格个数约为 8.00×10^5 个,单元质量(element quality)均值为 0.880 69,偏斜度(skewness)均值为 0.149 65,并且计算检查后质量良好无负体积出现。本文模拟工况条件为风携沙且风沙流的马赫数均小于 0.3,故将模型入口设置为均匀流速度入口(velocity-inlet),出口设置为压力差为 0 的压力出口(pressure-outlet),其他边界条件为墙(wall),并且上边界与左右边界的粗糙度值为 0,下边界为默认值[16-17]。根据风沙流各项运动特性,将速度入口分为空气入口及高度为 2 m 的空气和沙子入口,空气的密度 $\rho=1.225$ kg/m^3,黏度 $\mu=1.789\times10^5$ Pa·s,沙子的直径 $d_s=0.15$ mm,密度 $\rho_s=2\ 600$ kg/m^3,黏度 $\mu_s=0.004\ 7$ Pa·s,风速大小及沙子的体积分数根据模拟工况而定[18-19]。风沙流为气固两相流,沙颗粒为稀相,可以使用的欧拉双流体模型进行求解,本文只研究流场和积沙,控制方程考虑基本方程、质量守恒方程、动量守恒方程,附加标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型[20],把沙颗粒和空气看成两种流体,空间各点都有其不同的速度和密度,两种流体存在同一空间并相互渗透,但各有不同的体积分数,相互有滑移;沙相选取 Syamlal-obrien 模型,空气与沙颗粒选取 Schiller-naumann 模型,使沙颗粒与沙颗粒、沙颗粒与空气有相互作用,并保证来流中沙颗粒的紊流输运取决于气固间的作用力[21-22]。在进行数值计算时为使计算结果精度和收敛性良好,使用 SIMPLE 算法对方程组进求解,并将各个方向上的速度、湍动能 k 和耗散率 ε 的残差收敛标准均设置为 1.00×10^{-5}。

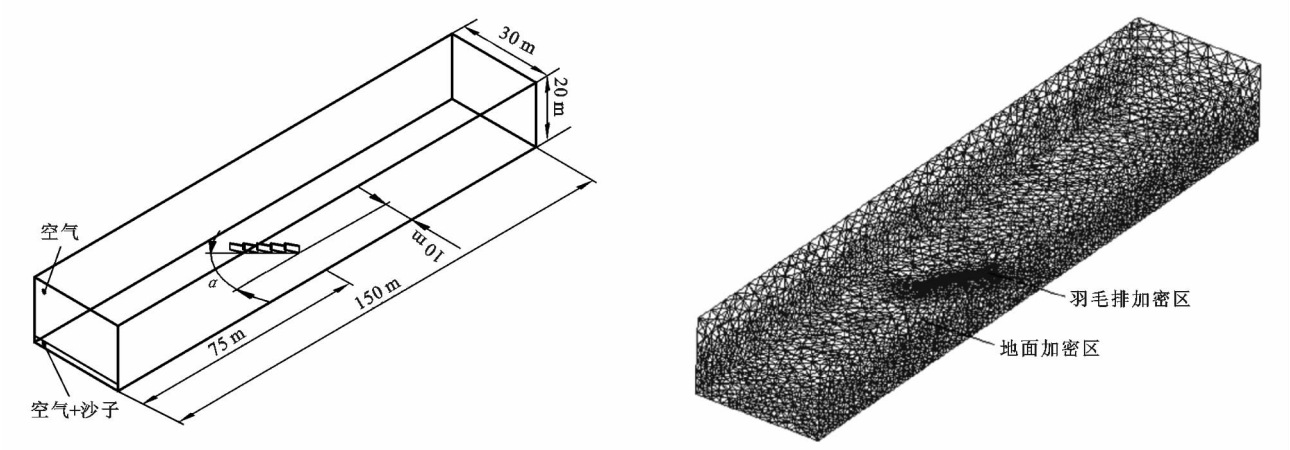


图 3　模型的建立及网格划分

2　结果与分析

2.1　3 种侧向输导工程的流场对比分析

计算域中取高度为 0.5 m 水平切面,风速为 15 m/s时,3 种侧向输导工程的风速云图如图 4 所示。

由图 4 可得,侧向输导工程的作用机理不同于普通的阻固沙结构,主要是边界层上的剪切流作用下的

平面绕流，流场可划分为输导区和减速区，其中减速区又可分为障前减速区和障后减速区。封闭式羽毛排、开放式羽毛排和一字排的流场特征有明显区别，封闭式羽毛排由相互搭接的单片羽毛排构成，相邻单片羽毛排间有一定的重叠长度和间距，利于对工程前方的来流风速的减弱，使障前和障后的减速区的面积明显高于开放式羽毛排和一字排；开放式羽毛排不同于封闭式羽毛排，工程前方的来流从相邻的单片羽毛排的间距中通过，在障前形成范围较小锯齿状减速区，并且由于其通透结构，在工程前后压力差的作用下，使相邻羽毛排之间形成了小范围的加速区，并减小了障后减速区的面积；一字排为普通挡沙墙与风向形成一定夹角时演变而来，随着夹角的增大，普通挡沙墙对来流的阻挡作用逐渐减弱，障前的减速区逐渐减小，障后的回流区逐渐变为减速区，进而才能对来流进行侧向输导。

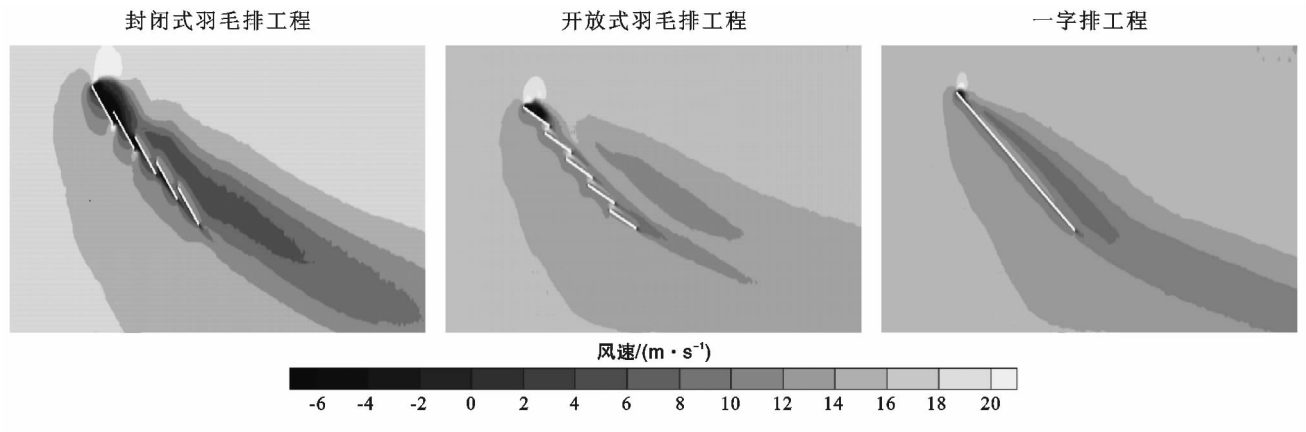


图 4 风速 15 m/s 条件下 3 种侧向输导工程周围速度云图

风速分别为 10，15，20 m/s 时，分别在 3 种侧向输导工程的头部、中间和尾部前方 1 m 处的风速廓线如图 5 所示。由于结构的差异，3 种侧向输导结构头部、中间和尾部的风速廓线形状、分布和数值大小不相同。随着风速的增大，3 种侧向输导结构头部、中间和尾部风速廓线的间距在不断增大，说明风速在增加，封闭式羽毛排、开放式羽毛排和一字排对其流场的影响的作用在不断增大，同时输导能力也在不断增大。分别对比 3 种侧向输导结构头部、中间和尾部的风速廓线发现，由于封闭式羽毛排和一字排的输导发生在工程前方，开放式羽毛排的输导发生在排间，所以来流风速在开放式羽毛排前的减速效果不明显，在封闭式羽毛排和一字排前的减速效果比较明显，并且一字排是不透风的体结构，风速廓线受到工程遮蔽效应的影响，变化规律不明显，而封闭式羽毛排各单排的间距和重叠长度可有效的减少迎风面上的阻力和工程前后的压力差，使风速逐级递减。工程中间近地面的风速受其他不确定因素的影响较少，其风速的大小可以决定输导能力的高低，在风速为 10 m/s 时，只有一字排中间的近地面风速大于 6 m/s，风速为 15，20 m/s 时，3 种侧向输导结构的近地面风速都大于 6 m/s，且一字排中间的近地面风速最大约为 14 m/s。

2.2 3 种侧向输导工程的积沙对比分析

侧向输导工程的输导率的高低可以决定工程的适用性和耐久性，基于风速较大沙源丰富、风速较大沙源一般和风速一般沙源丰富 3 种工况取高度为 0.01 m 的截面，分别对封闭式羽毛排、开放式羽毛排和一字排进行积沙对比分析可以充分研究其适用工况，为其在实际工程中的使用提供理论的参考。

2.2.1 *工况 1 风速较大沙源丰富* 来流的风速较大且沙源丰富时，3 种侧向输导工程的积沙体积分数云图如图 6 所示。由于工况 1 风速为 20 m/s 且沙子的体积分数为 2%，较大的风速可以为工程侧向输导提供足够的动能，但来流中沙子的体积分数较大，容易造成堆积。封闭式羽毛排的积沙区域主要为工程前方，大量沙颗粒在工程前方产生堆积后，少量沙颗粒通过各羽毛排的间距运动到工程后方的保护区域，并且每个单片羽毛排上的积沙量在逐渐增加，在工程后方形成了垄状堆积。

风沙来流经过组成开放式羽毛排工程的各排间后会扩散减速，开放式羽毛排工程前方的积沙较少，沙颗粒主要沉积在工程后方，并且由于主流主要从排间通过，输导方向后方的沉积量也不大。一字排在对来流输导后积沙主要在工程前侧，工程后方的保护区域内没有沙颗粒的沉积，经过工程前方的输导，工程尾部的积沙量大于工程头部，在工程的后方产出了垄状堆积。因输导产生的沙颗粒堆积面积的分布可用于对比 3 种侧向输导工程对工况 1 的输导效率，封闭

式羽毛排和一字排形成的堆积面积明显大于开放式羽毛排,说明封闭式羽毛排和一字排的输导效率高于开放式羽毛排,并且由于一字排形成的垄状堆积较窄,工程后方也没有积沙区域的产生。因此,风速较大沙源丰富(工况 1)时,应选用一字排对来流进行的侧向输导。

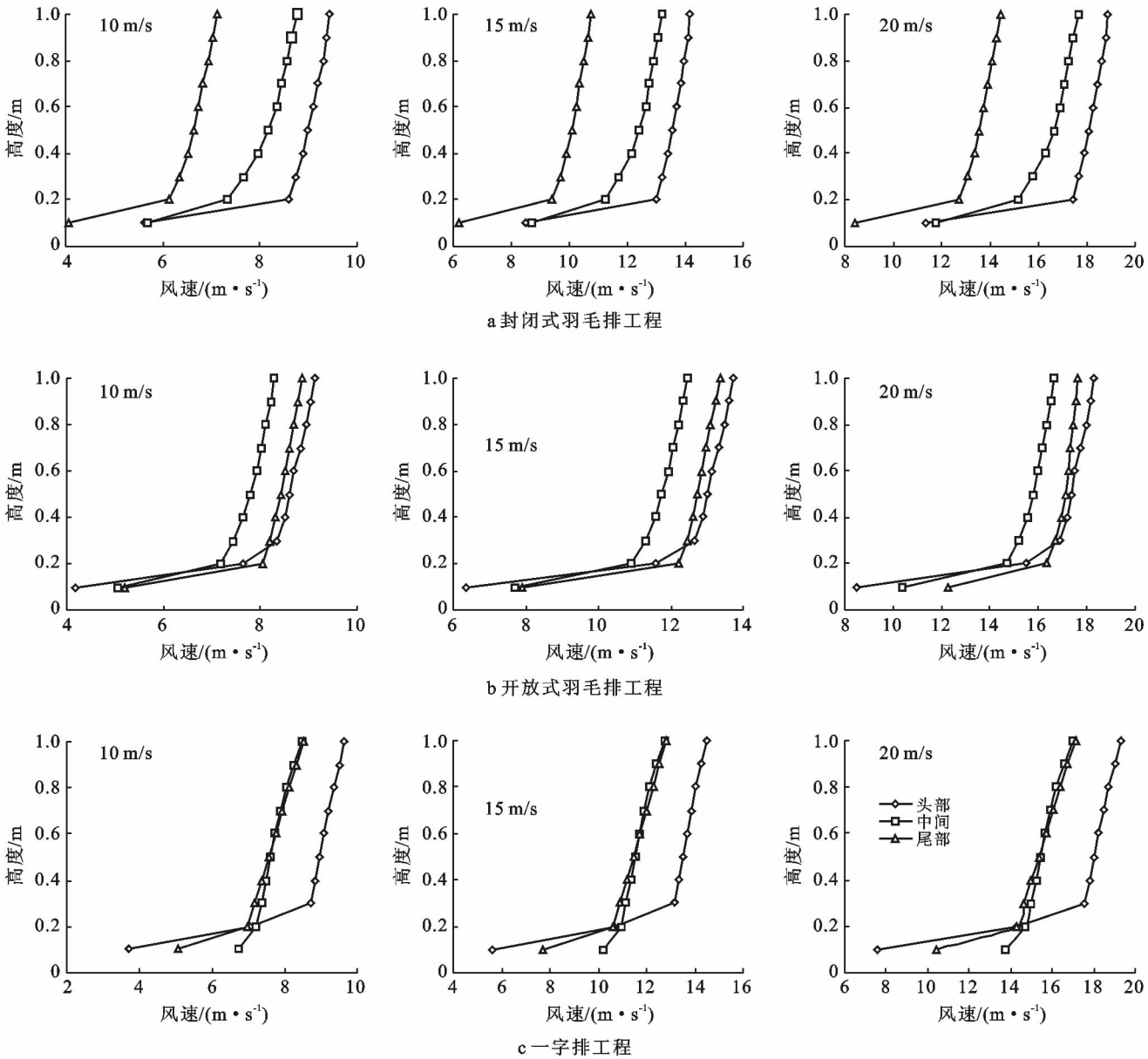


图 5　三种侧向输导工程周围的风速廓线

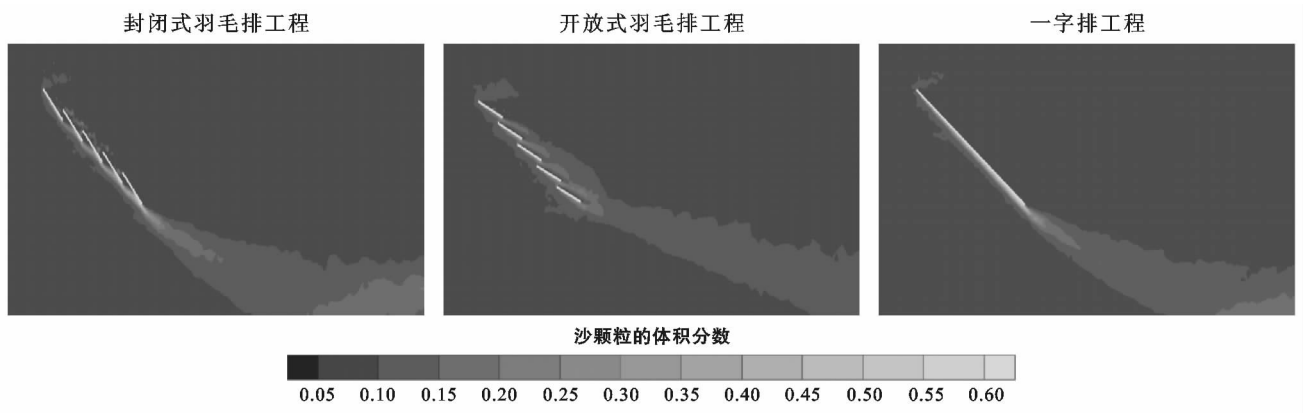


图 6　工况 1 条件下 3 种侧向输导工程积沙云图

2.2.2 工况 2 风速较大沙源一般 模拟工况 2 为风速较大沙源一般时，风速为 20 m/s 沙子的体积分数为 1%，3 种侧向输导工程的积沙体积分数云图如图 7 所示。对比 3 种侧向输导工程的积沙云图可得，由于沙颗粒含量较少，工程周围的沉积也较少，封闭式羽毛排与一字排沙颗粒的堆积发生在前侧，开放式羽毛排的堆积发生在工程后侧。此种工况下风能可以提供足够的输导动力且沙颗粒较少不利于减速沉积，来流通过封闭式羽毛排与一字排时，由于主流从工程前方经过其输导效率较高，大部分沙颗粒将会沿着输导方向运动到指定的区域产生堆积，长此以往使工程预后较差将缩短工程的使用年限，而来流通过开放式羽毛排时，沙颗粒将分为 3 部分，一部分沉积在羽毛排附近，一部沿着输导方向运动在指定区域沉积，一部分在风速的作用下以非堆积搬移的形式通过保护区，因其对沙颗粒的分流作用使工程的使用年限大大提高。因此，风速较大沙源一般（工况 2）时，应选用开放式羽毛排对来流进行的侧向输导。

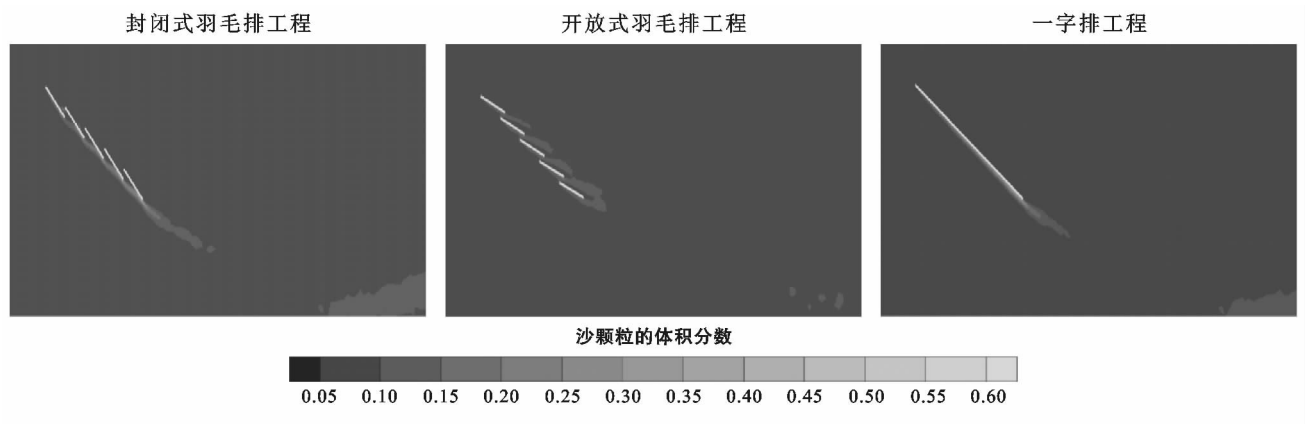


图 7 工况 2 条件下 3 种侧向输导工程积沙云图

2.2.3 工况 3 风速一般沙源丰富 工况 3 为风速一般沙源丰富，风速为 10 m/s 沙子的体积分数为 2%，由于沙颗粒含量较大输导力不足，容易造成沙颗粒的堆积，3 种侧向输导工程的积沙体积分数云图如图 8 所示。风速一般，来流经过侧向输导工程产生的输导力较小，开放式羽毛排工程前后都有大范围积沙分布，其后方保护区内的堆积范围大于工程前侧，在野外不定常风速下，大量的障后积沙可能对保护区产生危害；封闭式羽毛排与一字排都在工程前方形成了大范围的积沙，但一字排的侧向输导能力强于封闭式羽毛排，使封闭式羽毛排工程前侧的积沙量大于一字排，后方的堆积量相反，所以，封闭式羽毛排在工况 3 下，使大量的沙颗粒沉积在工程前侧，减少输导区域的堆积，使其使用年限优于一字排。因此，风速一般沙源丰富（工况 3）时，应选用封闭式羽毛排对来流进行的侧向输导。

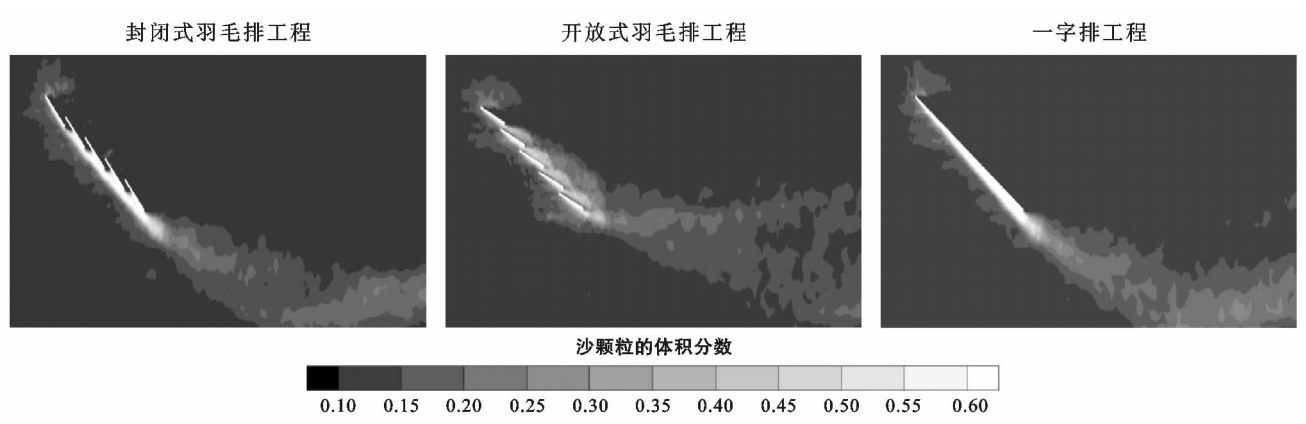


图 8 工况 3 条件下 3 种侧向输导工程积沙云图

3 结 论

（1）3 种侧向输导工程流场按风速大小可划分为输导区和减速区，但由于结构的不同，开放式羽毛排主流从排前经过，输导区内风速廓线变化较小，并且工程前侧的减速区面积小于其他两种输导工程；封闭

式羽毛排和一字排主流从排前经过,输导区内风速廓线变化较大,但封闭式羽毛排前侧的减速区面积大于一字排。

(2) 利用风速大小及含沙量将环境分为风速较大沙源丰富、风速较大沙源一般和风速一般沙源丰富3种工况研究3种侧向输导工程的积沙形态,发现不同工况下封闭式羽毛排、开放式羽毛排和一字排的适用条件也不同,对其实际工程的应用有重大意义。

(3) 由于风速强弱沙颗粒含量不同,一字排的实体挡墙结构可以有效遮蔽后方保护区,开放式羽毛排式使沙颗粒以非堆积搬运的形式通过保护区,封闭式羽毛排使沙颗粒逐级沉积减少后方堆积的压力。因此,风速较大沙源丰富,风速较大沙源一般和风速一般沙源风速时,应分别使用一字排、开放式羽毛排和封闭式羽毛排对来流进行输导。

[参 考 文 献]

[1] 沈洁,李耀辉,朱晓炜.西北地区气候与环境变化影响沙尘暴的研究进展[J].干旱气象,2010,28(4):467-474.

[2] 杨绚,李栋梁.中国干旱气候分区及其降水量变化特征[J].干旱气象,2008,26(2):17-24.

[3] 郭慕萍,王志伟,秦爱民,等.54年来中国西北地区降水量的变化[J].干旱区研究,2009,26(1):122-127.

[4] 葛盛昌,周林森.兰新铁路沙害成因及防治对策[J].铁道运输与经济,2007,29(1):33-34.

[5] 鲍锋,董治宝.青藏铁路察尔汗盐湖段风沙活动特征[J].中国沙漠,2017,37(4):621-625.

[6] 安志山,张克存,屈建军,等.青藏铁路沿线风沙灾害特点及成因分析[J].水土保持研究,2014,21(2):285-289.

[7] Huang Ning, Xia Xianpan, Tong Ding. Numerical simulation of wind sand movement in straw checkerboard barriers. [J]. European Physical Journal(E): Soft Matter, 2013,36(9):99.

[8] 王强强,唐进年,杨自辉,等.埋嵌式塑料网带状沙障的固沙效应及其应用前景[J].中国水土保持,2017(4):35-38.

[9] Zhang Dengshan, Wu Wangyang, Tian Lihui, et al. Effects of erosion and deposition and dimensions selection of straw-checkerboard barriers in the desert of Qinghai Lake[J]. Scientia Geographica Sinica, 2014,66(4):426-435.

[10] 景文宏,程建军,蒋富强.轨枕式挡墙挡风沙功效的数值模拟及试验研究[J].铁道科学与工程学报,2016,13(1):46-54.

[11] Cheng Jianjun, Lei Jiaqiang, Li Shengyu, et al. Effect of hanging-type sand fence on characteristics of wind-sand flow fields[J]. Wind & Structures, An International Journal, 2016,22(5):555-571.

[12] 李凯崇,刘贺业,蒋富强,等.斜插板挡沙墙风沙防治现场试验研究[J].中国铁道科学,2013,34(2):46-51.

[13] 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.

[14] Izael A L, Ascanio D A, Eric J R P, et al. Optimal array of sand fences[J]. Scientific Reports, 2017,7:45-48.

[15] 程建军,智凌岩,薛春晓,等.铁路沿线下导风板对风沙流场的控制规律[J].中国铁道科学,2017,38(6):16-23.

[16] 辛国伟,程建军,杨印海.铁路沿线挂板式沙障开孔特征与风沙流场的影响研究[J].铁道学报,2016,38(10):99-107.

[17] 辛国伟,程建军,景文宏,等.来流廓线对风沙流场和风沙堆积影响的数值模拟:以挡沙墙为例[J].干旱区研究,2016,33(3):672-679.

[18] 王翠,李生宇,雷加强,等.近地表风沙流结构对过渡带不同下垫面的响应[J].水土保持学报,2014,28(3):52-56.

[19] 张正偲,董治宝,赵爱国,等.沙漠地区风沙活动特征:以中国科学院风沙观测场为例[J].干旱区研究,2007,24(4):550-555.

[20] 王康龙,武建军,罗生虎.风沙运动的欧拉双流体模型参数研究[J].中国沙漠,2014,34(6):1461-1468.

[21] 武生智,任春勇.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,2012,48(1):104-107.

[22] 王康龙,武建军,罗生虎.风沙运动的欧拉双流体模型参数研究[J].中国沙漠,2014,34(6):1461-1468.