

# 挡沙堤—固沙砖综合型体系防风固沙效果的数值模拟

孙婧<sup>1,2,3</sup>, 李家园<sup>1</sup>, 刘勇智<sup>1</sup>, 张少云<sup>1</sup>, 刘宏波<sup>1,2</sup>, 郑瑞海<sup>4</sup>

(1.河北建筑工程学院 土木工程学院, 河北 张家口 075000; 2.河北省土木工程诊断、改造与抗灾重点实验室, 河北 张家口 075000; 3.河北省高校道桥结构健康监测与维修加固应用技术研发中心, 河北 张家口 075000; 4.河北省沥青路面工程固废综合利用技术创新中心, 河北 张家口 075000)

**摘要:** [目的] 针对河北省张家口市坝上地区风沙流对公路造成的沙埋问题, 建立了挡沙堤—固沙砖综合型防风固沙体系, 并对其防风固沙效果进行分析, 以为公路风沙灾害防治提供相关技术参数。[方法] 利用ANSYS软件对挡沙堤周围流场变化、沙粒运动轨迹、固沙砖沙障间距以及固沙砖沙障周围积沙情况进行数值模拟研究, 评价挡沙堤—固沙砖综合体系的防风固沙效果。[结果] ①风沙流经过挡沙堤时, 会在其周围形成减速区、加速区、紊流区和恢复区, 通过风沙流减速区流场分析得到, 边坡率为1:1.2的挡沙堤防风固沙效果最佳。②利用离散相模型(DPM)模拟了沙粒跃移挡沙堤的运动轨迹。当风速为12~20 m/s时, 沙粒落在距挡沙堤11~21 m的位置, 进而确定铺设固沙砖沙障的相对位置。③当固沙砖起始位置距挡沙堤11 m, 铺设成11排, 1 m×1 m的方格形式时, 固定地表流沙效果最佳。[结论] 挡沙堤—固沙砖综合体系通过“远阻近固”的方式来降低风速, 阻挡地表流沙, 固沙砖沙障能有效防止翻越挡沙堤沙粒的再次起动, 改善公路沙埋现象, 保证风沙灾害区域的行车安全。

**关键词:** 综合防风固沙体系; 挡沙堤; 固沙砖; 数值模拟; 沙粒起动

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)04-0135-10

中图分类号: X820.3

**文献参数:** 孙婧, 李家园, 刘勇智, 等. 挡沙堤—固沙砖综合型体系防风固沙效果的数值模拟[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 135-144. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.018; Sun Jing, Li Jiayuan, Liu Yongzhi, et al. Numerical simulation of windbreak and sand fixation effects of an integrated sand-retaining dike and sand-fixing brick system [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 135-144.

## Numerical Simulation of Windbreak and Sand Fixation Effects of an Integrated Sand-retaining Dike and Sand-fixing Brick System

Sun Jing<sup>1,2,3</sup>, Li Jiayuan<sup>1</sup>, Liu Yongzhi<sup>1</sup>, Zhang Shaoyun<sup>1</sup>, Liu Hongbo<sup>1,2</sup>, Zheng Ruihai<sup>4</sup>

(1.School of Civil Engineering, Hebei University of Architecture, Zhangjiakou,

Hebei 075000, China; 2.Hebei Key Laboratory for Diagnosis, Reconstruction and

Anti-disaster of Civil Engineering, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 3.Hebei University

Road and Bridge Structure Health Monitoring and Maintenance and Reinforcement Application Technology

Research and Development Center, Zhangjiakou, Hebei 075000, China; 4.Hebei Provincial Asphalt Pavement

Engineering Solid Waste Comprehensive Utilization Technology Innovation Center, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

**Abstract:** [Objective] In view of the sand burying problem caused by the wind and sand flow on the highway in Bishang area of Zhangjiakou City, Hebei Province, a comprehensive wind and sand fixing system of sand retaining dike sand fixing brick was established, and its wind and sand fixing effect was analyzed, in order to provide relevant technical parameters for the prevention and control of wind and sand disasters on the highway. [Methods] The flow field change around the sand retaining dike, and sand particle movement trajectory, sand-fixing brick spacing, and sand accumulation around the sand-fixing brick were numerically simulated by ANSYS software to evaluate the wind-prevention and sand-fixation effects of the integrated

收稿日期: 2021-12-05

修回日期: 2022-01-21

资助项目: 河北省科技厅重点研发计划项目“冀北风沙地区废弃铁尾矿道路阻沙屏障关键技术研究”(20373802D); 河北省建设科技研究计划项目(2020-266)

第一作者: 孙婧(1980—), 女(汉族), 山东省济南市人, 副教授, 硕士研究生, 硕士生导师, 主要从事防灾减灾工程方面的研究。Email: kathy2001joy@163.com。

通讯作者: 刘宏波(1977—), 男(汉族), 山西省寿阳市人, 博士, 副教授, 主要从事混凝土结构方面的研究。Email: bo-hong@126.com。

sand-retaining dike and sand-fixing brick system. [Results] ① A deceleration zone, an acceleration zone, a turbulence zone, and a recovery zone were formed around the sand-retaining dike as wind and sand passed through it. The sand-retaining dike with a slope ratio of 1 : 1.2 had the most effect on slowing wind and fixing sand. ② A discrete phase model (DPM) was used to simulate the trajectory of sand jumping on the sand-retaining dike. When the wind speed is 12~20 m/s, the sand falling point was 11~21 m away from the sand-retaining dike, and then the relative position of laying the sand-fixing brick was determined. ③ When the starting position of sand-fixing bricks was 11 m away from the sand-retaining embankment, and they were laid in 11 rows in a square form of 1 m×1 m, then the effect of fixing surface quicksand was the best. [Conclusion] The integrated sand-retaining dike and sand-fixing brick system reduced the wind speed and blocked the surface quicksand by “far-resistance and near-fixation”. The sand-fixing brick barrier can effectively prevent the restart of sand particles crossing the sand retaining dike, thereby decreasing the occurrence of highway sand burial, and ensuring driving safety in wind and sand disaster areas.

**Keywords: integrated windbreak and sand-fixation system; sand-retaining dike; sand-fixing brick; numerical simulation; sand start**

随着京张冬奥会的举办和京津冀一体化发展进入加速推进期,便捷安全的交通是区域经济发展的重要保障,高速公路建设迈入了发展的快车道。河北省张家口市坝上地区,由于历史上多种原因,大量森林、草原遭到破坏,干旱的气候条件下水土流失,风沙等自然灾害频繁<sup>[1]</sup>。如何保障穿越沙漠区公路在风沙灾害侵袭下的正常运营是一个亟待解决的工程技术问题。风沙灾害防治方法包括生物、机械和化学 3 大类,但由于沿线气候、水文条件等因素的影响,春冬两季大风极端干燥环境下植物成活率较低,生物防风固沙体系不宜采用,而化学固沙对环境造成的污染较大;因此,机械固沙方式在二秦高速风沙灾害治理中具有无可替代的作用。机械防风固沙体系在荒漠区公路中应用比较广泛<sup>[2-5]</sup>,国内外学者<sup>[6-8]</sup>也对各类形式的机械沙障防风固沙效果展开了大量野外试验、数值模拟及风洞试验研究,取得了许多重要的科研成果和经验。例如,李晓军等<sup>[9]</sup>对挡沙墙周围风沙流积沙情况进行了数值模拟,发现挡沙墙和公路的积沙量与入口风速值的关系;丁泊淞等<sup>[10]</sup>基于欧拉双流体非定常模型,对不同倾角斜插板式沙障的阻沙效果进行了数值模拟研究;张凯等<sup>[11]</sup>采用数值模拟结合现场试验,得出不同孔隙率的 HPDE 板后风沙有效遮蔽距离,进一步确定了综合防风固沙体系。国外, Gillies 等<sup>[12]</sup>通过对不同间距的防风栅栏进行了现场试验,得出随着防风栅栏距离的增加,背风侧的沙通量呈指数衰减;Sarah 等<sup>[13]</sup>通过数值模拟和风洞试验实测数据,得出多孔防风栅栏的遮蔽效果与其高度和孔隙率等参数的关系;Lee 等<sup>[14]</sup>通过现场试验研究了盐渍沙地区多孔防风栅栏抗风蚀能力,揭示出防风栅

栏背风侧的沙粒平均速度、沙通量、沙体积浓度及动能的变化规律。综上所述,沙漠公路防风固沙措施不同、设置原理不同,其风沙防治能力也有差异,与所在地区特殊的气候条件及水文工程、地质等环境因素密切相关。

本文以二连浩特—秦皇岛高速公路(简称“二秦高速”)张家口风沙灾害路段为研究对象,设计利用挡沙堤和固沙砖的综合型体系来防风固沙。其中挡沙堤作为较为成熟、科学的不透风式防风阻沙措施,具有就地取材(采用当地的沙土堆积而成)、便于施工等优点<sup>[15-16]</sup>;但当挡沙堤风化严重且风速较大时,翻越挡沙堤的沙量增加,沙粒在风力的作用下再次起动,还是会对公路造成威胁<sup>[17]</sup>,因此需在挡沙堤后再增设一道防风固沙屏障。考虑到张家口地区矿产资源丰富,尾矿堆库储量巨大,因地制宜地将尾矿砂作为原料制成多孔固沙砖作为新型机械固沙沙障有着经济环保、就地取材、制作简单、安装便捷等优点<sup>[18]</sup>。笔者在利用尾矿砂制备固沙砖方面进行大量研究,得到固沙砖的最佳结构参数及设计将其铺设成方格状,联合挡沙堤作为综合型防风阻沙措施来保护公路。基于 ANSYS 数值模拟软件,对挡沙堤—固沙砖综合防风固沙体系进行研究,重点对挡沙堤与固沙砖周围风沙流运动进行模拟分析,选择出最佳边坡率的挡沙堤以及固沙砖的具体参数,并且进一步对挡沙堤与固沙砖综合型防护体系进行优化分析,得到固沙砖与挡沙堤的最优距离,以期为沙漠公路风沙灾害治理提供可靠的技术参数。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区概况

二秦高速张家口路段西起康保县东至沽源县,是

打通河北北部与内蒙古中东部等边界地区的关键通道,所经地区属于典型的温带大陆型气候区,天气干燥,风力强劲且频次高,张家口坝上地区全年以偏北和偏西北方向为主,2015—2020年平均风速为3.6~4.1 m/s,年平均8级以上大风日数10~30 d,定时风

速和瞬时最大风速分别为19.8和25 m/s<sup>[19]</sup>。该地区地势平坦,平均海拔1 536 m,沙源丰富,且线路周围风沙路段占全线长度的50%以上,在K7+000—K9+000区段(张家口市沽源县白脑包村一带)具有大型移动沙丘(图1),该路段风沙灾害最为严重。

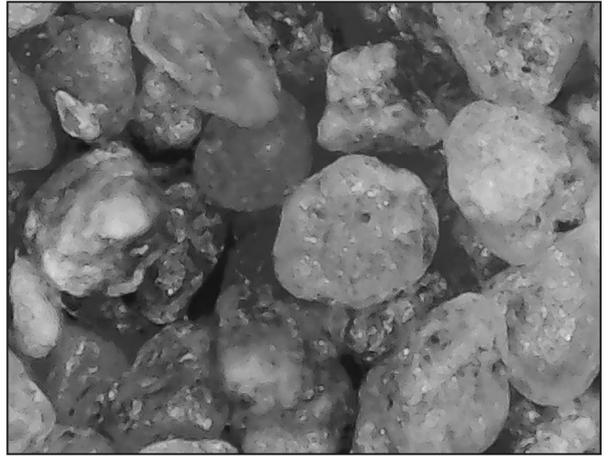


图1 二秦高速公路沿线积沙和沙粒细观图

## 1.2 沙粒粒径的研究

2021年5月,在现场典型灾害路段(K7+000—K9+000)附近进行了沙粒采集,通过手持式数码显微镜观察沙粒,结果如图1所示。由图1可以看出,沙粒的直径大多在3 mm以下,颗粒形状近似椭圆、圆,因为沙粒经过风力作用下,在搬运过程中沙粒之间的相互碰撞、摩擦所造成的。因此,为便于计算,模型中沙粒相形状选取圆球体。在数值模拟中,为使风沙二相流中沙粒相粒径大小、密度等边界条件的设置符合实际,不同模型研究所得的结果更加准确,进一步地对沙粒粒径分布特征进行了研究。通过多次筛分析试验,可知研究路段天然风积沙中0.075~0.30 mm粒径范围的质量百分数占90%左右,利用文献<sup>[20]</sup>中不同沙粒粒径对应沙粒起动风速值的计算公式算出,此粒径范围沙粒对应的起动风速均值为5.1 m/s。

## 1.3 流场模型的建立

1.3.1 模型建立 沙粒在风场中受到风力、重力及拖拽力等,可在同一平面进行解释,故运用ANSYS-CFD建立二维平面模型。在现场调研和模型试验基础上,确定挡沙堤模型为等腰梯形,高度取2 m,顶面宽度取为1 m,边坡率分别设置为1:0.75,1:1,1:1.2,1:1.5。经过模型比较计算,计算域设置为50 m×10 m,超出此范围,挡沙堤对风速影响很小。为使湍流、风速充分发展,挡沙堤迎风坡脚设置在距离风速入口15 m。对流场区域进行非结构网格划

分,计算域网格尺寸设为0.02 m,由于风沙流受边界层的影响较大<sup>[11]</sup>,对高度2 m以下进行网格加密,加密网格尺寸设为0.005 m,网格质量均值为0.96,网格质量较好,总共生成100万个网格,可以满足计算要求。

1.3.2 边界条件设定 根据研究区域的最大风速为19.8 m/s,故风速分别取12,15,18,20 m/s。由空气动力学原理可知,当马赫数小于0.3时,可认为是不可压缩流,故入口边界采用Velocity-Inlet;模型中不能保证流体自由流出,故出口边界采用Pressure-Outlet(压力差为0)。模型中,挡沙堤材料为当地沙土固化堆积而成,固地面以及上边界与空气接触的面均设为具有一定粗糙度的壁面,粗糙度设为 $K$ ( $K$ 取沙粒粒径的1/30),其他部分壁面粗糙度默认为0;气流经过防风设施背风侧时,因压力导致气流分流,易形成涡旋现象,故需附加标准的湍流模型;求解算法采用Simplec算法;步长设置为0.05 s,残差控制在 $1.00 \times 10^{-6}$ 内,湍流动能、动量等问题均采用二阶迎风格式,来保证收敛结果的准确性<sup>[21]</sup>。

## 1.4 模型的建立

1.4.1 离散相模型参数的选取 针对不同粒径沙粒跃移运动轨迹,离散相模型(DPM)得出的结果更加准确<sup>[22]</sup>,故采用该模型对沙粒跃移挡沙堤后的运动轨迹进行模拟。离散相模型参数设置:为分析挡沙堤固定地表流沙能力,颗粒喷射类型选择为Group,入射范围0~0.5 m;为更加详细地观察不同粒径沙粒在

模型中的运动方式<sup>[15]</sup>, 粒径分布采用 Rosin-Rammler 函数, 喷射 50 束颗粒流; 根据风沙灾害路段取样结果, 沙粒粒径范围在 0.075~0.30 mm, 因此设置最大粒径为 0.30 mm, 最小粒径为 0.075 mm, 经计算中值粒径为 0.15 mm, 沙粒密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>, 沙粒相考虑重力, 重力加速度为 -9.81 m/s<sup>2</sup>。

1.4.2 欧拉相模型参数的选取 欧拉双相流模型 (Eular) 是现阶段计算风沙流最常用的模型, 具有较高的计算效率<sup>[23]</sup>, 故采用该型进行瞬态计算, 得到综合防风固沙体系一固沙砖沙障内部积沙效果图。欧拉双相流模型参数设置: 由于现场最大风速出现在 5 月, 气温在 10 °C 左右, 黏度只与大气温度相关, 与压强无关, 按常态设置空气黏度为  $\mu = 1.789 \times 10^{-5}$  Pa·s; 现场所经区域平均海拔 1 536 m, 空气相密度取常态为 1.225 kg/m<sup>3</sup>, 压力取常压。沙粒相重力加速度、密度的设置与离散相模型中的设置相同, 因为双相流均为稀相, 故取下垫面沙粒的体积分数为

1%, 沙粒直径为 0.20 mm。综合文献研究结果<sup>[10,24]</sup>, 确定了模型参数: 风沙的相互阻力公式采用 Schiller-Naumann; 阻力系数和升力系数均选用 saffman-mei; 动力黏度和碰撞黏度均选用 Gidaspow; 摩擦黏度选择 Schaeffer; 最大堆积率设为 0.63, 动量交换系数采用 Syamlal-O' Brien 曳力模型, 碰撞恢复系数设为 0.9。

## 2 结果与分析

### 2.1 挡沙堤周围流场分析讨论

为得到风沙流经过挡沙堤后沙粒沉积变化规律, 对风沙经过挡沙堤时周围流场分布特点进行了研究。不同初始风速下 (12, 15, 18, 20 m/s), 挡沙堤两侧的风速变化廓形图大致相同, 考虑到张家口坝上二秦风沙路段超过 17 m/s 的年均大风日数较多, 因此, 选择初始入口风速为 18 m/s、风速均匀的情况为例, 进行挡沙堤周围风速分布等值线云图的分析, 结果如图 2 所示。

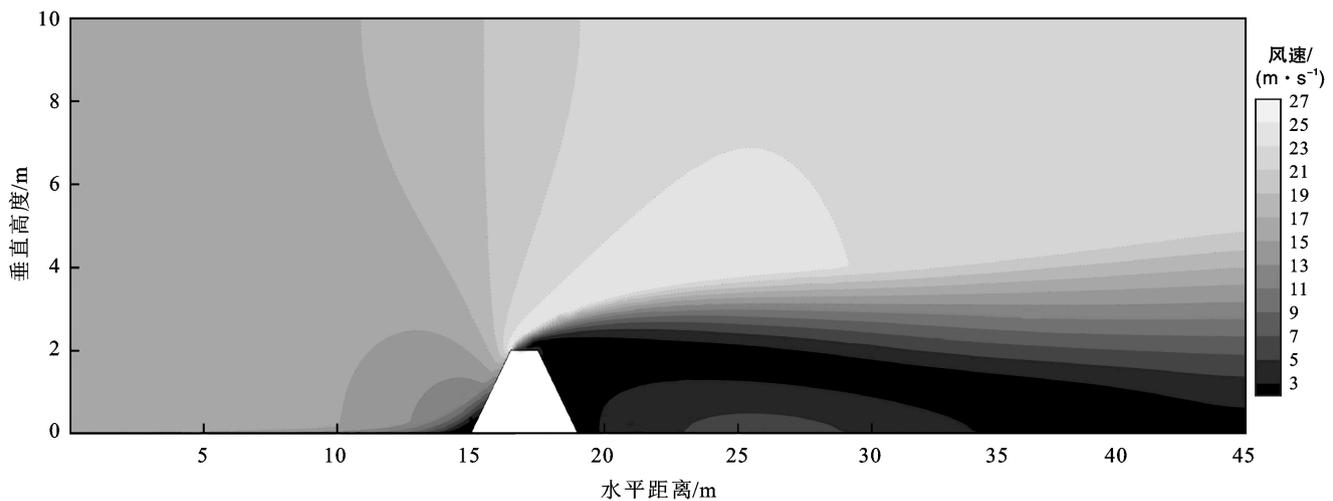


图 2 挡沙堤周围风沙流风速分布等值线图

由图 2 可以看出, 风沙流经过挡沙堤时, 在挡沙堤周围形成不同的气流速度分区。随着风速的变化, 风沙流挟沙能力存在差异, 当挡沙堤周围的气流速度小于沙粒的起动风速 (5.1 m/s) 时, 气流的挟沙能力大幅度衰减, 极易发生沙粒沉降现象; 挡沙堤周围气流速度分区较为复杂<sup>[15]</sup>, 因此有必要对风沙流在整个流场的分布规律进行统计分析。入口风速为 18 m/s 时, 在水平方向上, 离地面高度分别为 1.6, 2.2, 2.4 m 处, 风沙流速度值的变化趋势如图 3 所示。图 3 中显示, 风沙流经过挡沙堤时, 水平方向不同高度处, 风速值的变化范围存在显著差异, 但在不同高度处, 风沙流速度值均有相同拐点。风沙流经过流场入口到达挡沙堤坡脚处, 由于挡沙堤的阻挡, 风沙流

速度值逐渐降低, A 点迎风侧坡脚风速值衰减幅度最高为 11.2%, 风速值的衰减率随高度的增加而降低。风沙流从挡沙堤迎风侧坡脚到达坡肩处, 风沙流会在该区域发生叠加, 导风速值大幅度增加, 增长幅度最高可达 44.4%。经过坡顶 B 点后, 风沙会出现分流现象, 导致风速值迅速降低, 高度越大降低幅度越小, 1.6 m 高度处的风速衰减幅度最大, 接近于 0。最终, 随着风沙流翻越挡沙堤在背风侧继续向前移动, C 点背风侧坡脚后、不同高度处的气流速度逐渐增加最后趋于稳定; 并且在同一水平距离上, 随着高度的增加, 风沙流受挡沙堤阻挡的影响越小, 风沙流速度值恢复越快, 此处与石龙等<sup>[17]</sup>人得出的结论吻合。结合图 2—3 综合分析可知, 风沙流经过挡沙堤时会依次形

成4个区域:减速区域、加速区域、紊流区域、恢复区域。减速区域的风速值低于 $5.1\text{ m/s}$ 时,部分沙粒便会沉积在相应的气流减速位置上。

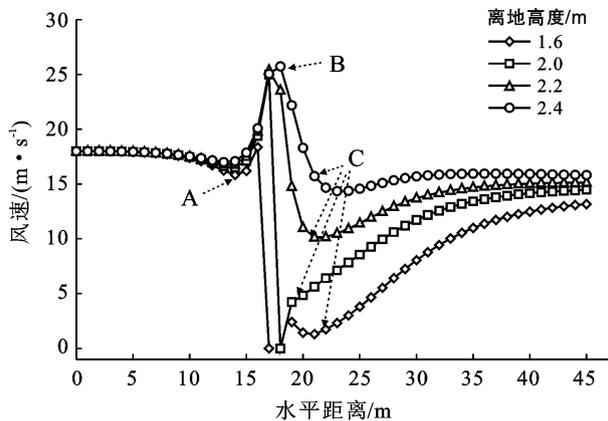


图3 水平方向不同高度挡沙堤周围风速变化

## 2.2 不同边坡率挡沙堤周围流场分析讨论

通过挡沙堤周围流场的分析,可发现风沙流经过挡沙堤在迎风侧及背风侧均存在气流减速区域,在此基础上,进一步研究挡沙堤迎风侧和背风侧不同高度处风沙流速度值变化规律,从而确定挡沙堤的最优边坡率。

### 2.2.1 挡沙堤迎风侧风速变化

不同入口风速下,挡沙堤迎风侧坡脚不同高度处的风速变化如图4所示。由图4可以看出,不同初始风速下,不同边坡率的挡沙堤对风的阻挡变化规律大致相同:在迎风侧高程大于 $2\text{ m}$ 处,风沙流速度值的生长均趋于平缓。以风速为 $18\text{ m/s}$ 为研究对象,分析图4可知,在入口风速一定时,在挡沙堤迎风侧坡脚垂直方向不同高度处,风沙流速度值的生长率及衰减率是不同的。在迎风侧高度在 $0\sim 2\text{ m}$ 范围内,风沙流速度值随着高度的增加而急剧上升。由于挡沙堤边坡率的不同,风沙流速度值的生长率呈现出差异。在高度 $2\text{ m}$ 以下时,风沙流速度值的变化与挡沙堤的边坡率规律性较差,但其生长率较大;当高程大于 $2\text{ m}$ 时,随着高程的增加,风沙流速度值生长率有显著降低的趋势,即随着高度的增加挡沙堤对风沙流的阻挡效果降低。综合分析图4可知,挡沙堤边坡率在 $1:0.75\sim 1:1.2$ ,高度 $2\text{ m}$ 以下时,风沙流速度值的变化与边坡率大小不存在显著的规律;在高度为 $2\text{ m}$ 时,不同边坡率的挡沙堤风沙流速度值存在相同的拐点;高度在 $2\text{ m}$ 以上时,风沙流速度值增长较为缓慢,不同高度处风沙流速度值随着边坡率的减小而降低,但边坡率小于 $1:1.2$ 时,风沙流速度值又会有所回升,拦截风沙流效果降低。

以入口风速 $18\text{ m/s}$ 为例,风沙流经过不同边坡率挡沙堤,堤后对应的风沙流速度最大值分别为 $21.3, 20.9, 20.1, 20.3\text{ m/s}$ ,边坡率为 $1:1.2$ 的堤后风速增长幅度最小( $11\%$ ),因此,迎风侧边坡率为 $1:1.2$ 挡沙堤防风固沙效果最佳。

### 2.2.2 挡沙堤背风侧风速变化

不同入口风速下,风沙流经过不同边坡率的挡沙堤时,在挡沙堤背风侧坡脚不同高度处风沙流速度值的变化如图5所示。由图5可以看出,不同入口风速下,风沙流经过同一边坡率的挡沙堤时,挡沙堤背风侧坡脚垂直方向上不同高程处,风沙流速度值的变化趋势基本一致,均随着高度的增高而逐渐上升;在挡沙堤背风侧不同高度处,风沙流遇阻形成气流速度大小分区,且气流的速度分区比迎风侧复杂。在挡沙堤背风侧 $2\text{ m}$ 以下,风沙流速度值呈现出先增加后减小的变化规律,且均小于沙粒的起动风速( $5.1\text{ m/s}$ );而在挡沙堤背风侧 $2\text{ m}$ 以上,由于失去挡沙堤这一屏障对风沙流的抑制,风沙流速度值较快恢复到初始风速值;且风沙流出现叠加效应造成其风速值急剧增加,形成气流加速区域,故该处风沙流速度值会大于初始风速值。风沙流速度变化曲线随着高度的增加逐渐趋于平缓,但风沙流速度值大于初始风速值,导致这一现象的原因是该高度处少部分风沙流的叠加,且风沙流速度值随高度的增加而降低。在挡沙堤背风侧高度 $3\text{ m}$ 处,在同一风速下,风沙流速度值随着边坡率减小,表现出降低的趋势,即风沙流速度值随边坡率的减小而降低;风沙流经过边坡率为 $1:1.5$ 的挡沙堤时,风速值出现转折(图5),不同入口风速下风沙流速度最大值分别为 $16.2, 20.9, 24.8, 27.5\text{ m/s}$ ,均大于前者的峰值 $15.9, 20.0, 24.5, 26.7\text{ m/s}$ (图5),所以背风侧边坡率为 $1:1.2$ 挡沙堤防风固沙效果最佳。

通过图4—5挡沙堤迎风侧、背风侧的风速变化廓形图可知,在挡沙堤高度( $2\text{ m}$ )以下,风沙流的风速值与边坡率没有规律性。但在挡沙堤高度( $2\text{ m}$ )以上,风速值会随着边坡率减小而降低,当边坡率减小至 $1:1.2$ 时,此时风沙流的绕流效果最佳,挡沙堤迎风侧与背风侧风速衰减效果最优,使得风沙流中的沙粒更多沉降在挡沙堤两侧;边坡率小于 $1:1.2$ 时,风沙流形成的绕流效果变差,风速衰减值也会降低,而且挡沙堤边坡率越大,施工工作量和工程造价也相应增加,使用过程中容易掩埋及受到更严重的风蚀,耐久性低。因此,综合分析挡沙堤后风速降低程度、阻沙效果以及工程造价,最终选择挡沙堤的边坡率为 $1:1.2$ 。

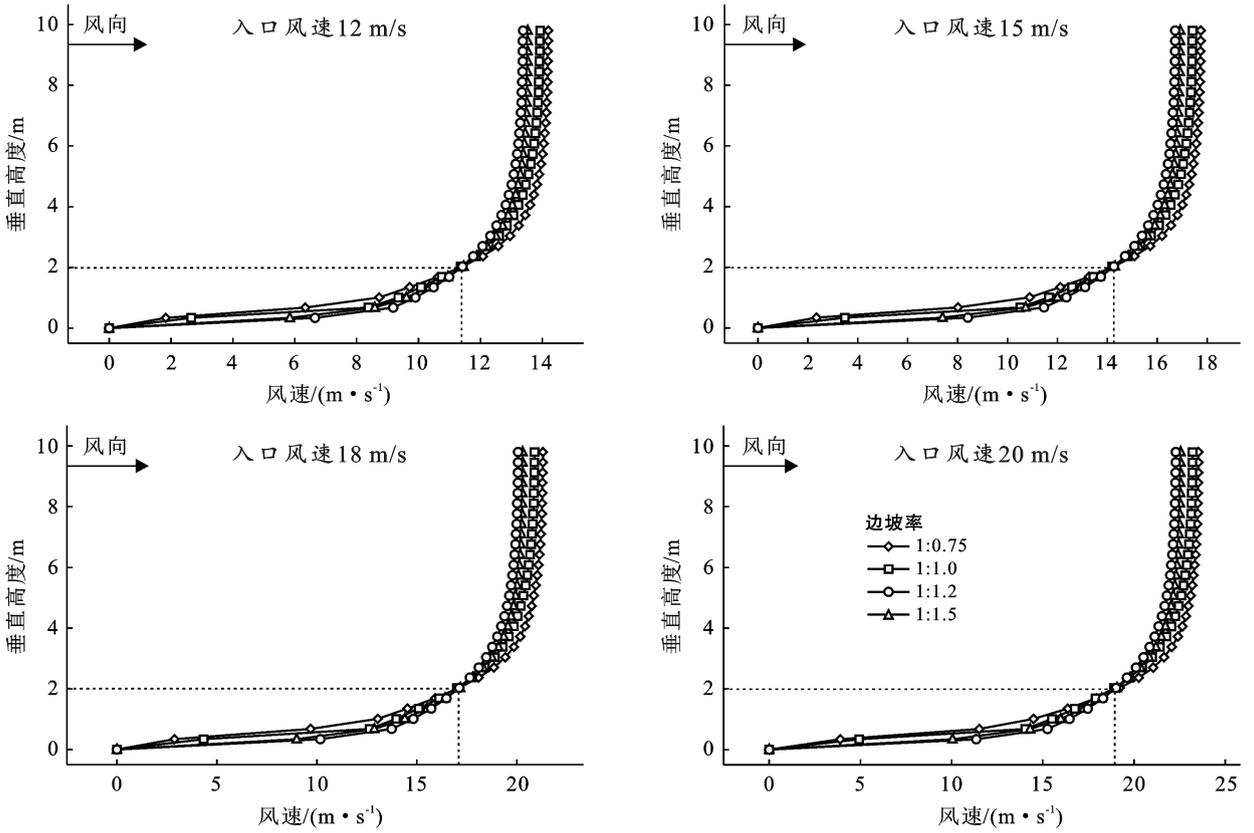


图 4 垂直方向不同风速下挡沙堤迎风坡脚风速变化

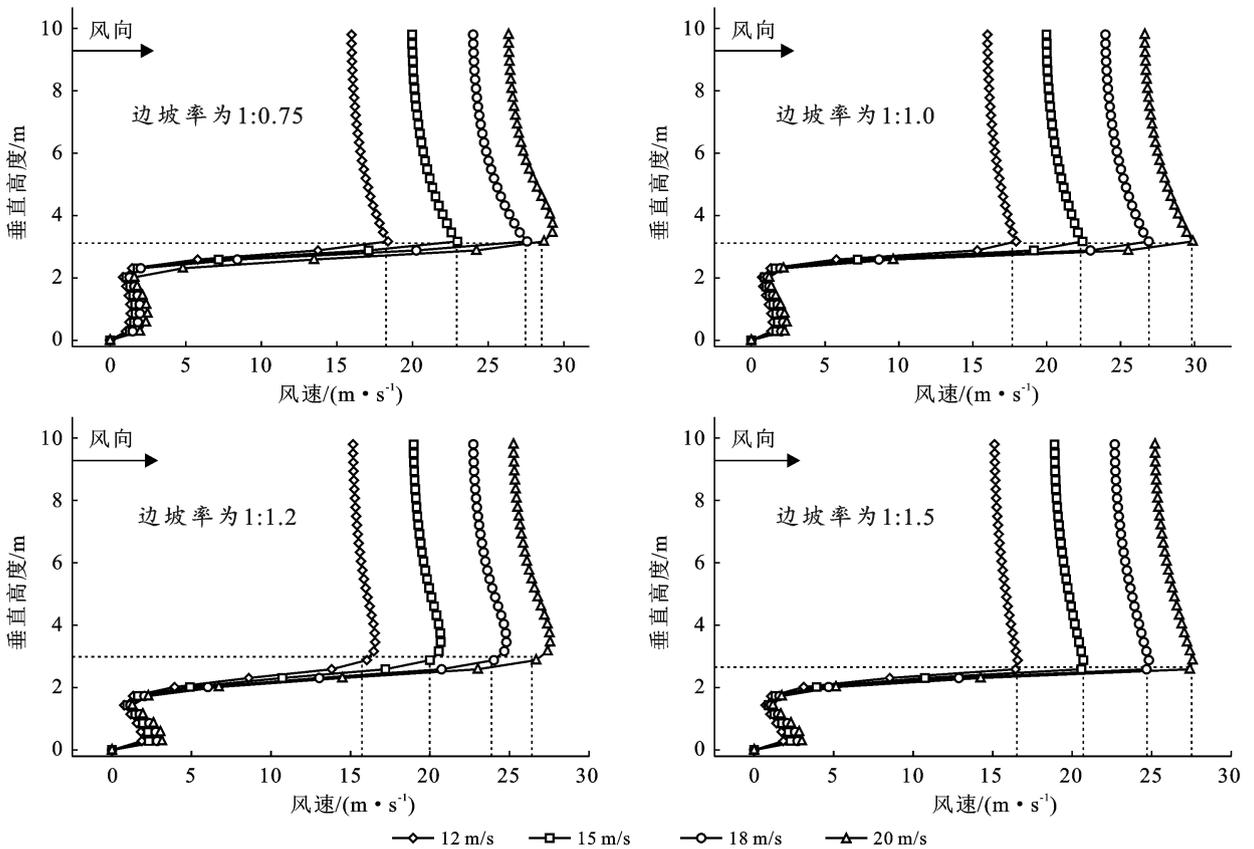


图 5 垂直方向不同风速下挡沙堤背风坡脚风速变化

### 2.3 挡沙堤后沙粒运动轨迹分析讨论

为确定不同风速下,风沙流中的沙粒跃移挡沙堤后的下落位置,利用离散相模型(DPM)模拟分析沙粒跃移挡沙堤后的运动轨迹,进而确定挡沙堤与固沙砖沙障之间的间距。根据谢虎雄等<sup>[22]</sup>人的研究,沙粒跃移轨迹是指沙粒在风力的作用下,考虑到地势较高的沙源由于粒径大小不同,重力势能呈现出差异,因此在本文的离散相模型分析中将赋予沙粒不同的初始动能,并考虑重力势能和气流拖曳力对沙颗粒的影响。结合0.075~0.30 mm的粒径大小,赋予沙粒一定的初始速度,对DPM模型下的沙粒跃移轨迹进行分析。挡沙堤的边坡率为1:1.2时,沙粒运动轨迹如图6所示,从图6得出,沙粒跃移挡沙堤时,沙粒会在挡沙堤迎风侧发生溅射、碰撞等,有部分沙粒堆

积,大部分沙粒在动能和势能的作用下,跃过挡沙堤做抛物线运动。在入口风速值为12 m/s时,在挡沙堤背风侧11 m处,不同粒径的沙粒在动能和势能的作用下开始依次下落(图6),同理得知,风速为15, 18, 20 m/s时,沙粒的下落位置距挡沙堤背风侧坡脚处分别为16, 19, 21 m。根据风沙流经过挡沙堤前后风速值变化的分析,结合图3—4可知,当风沙流经过挡沙堤的迎风侧与背风侧时,会在迎风侧与背风侧形成风速减速区,容易出现积沙现象。实际情况中,随着时间推移迎风侧积沙会逐渐增多,挡沙堤的阻沙能力降低,直到越过挡沙堤,背风侧的积沙在大于沙粒起动风速的作用下继续向前推进,再次形成新沙源,对公路造成掩埋,这一现象与崔晓宁<sup>[15]</sup>出的结论一致。

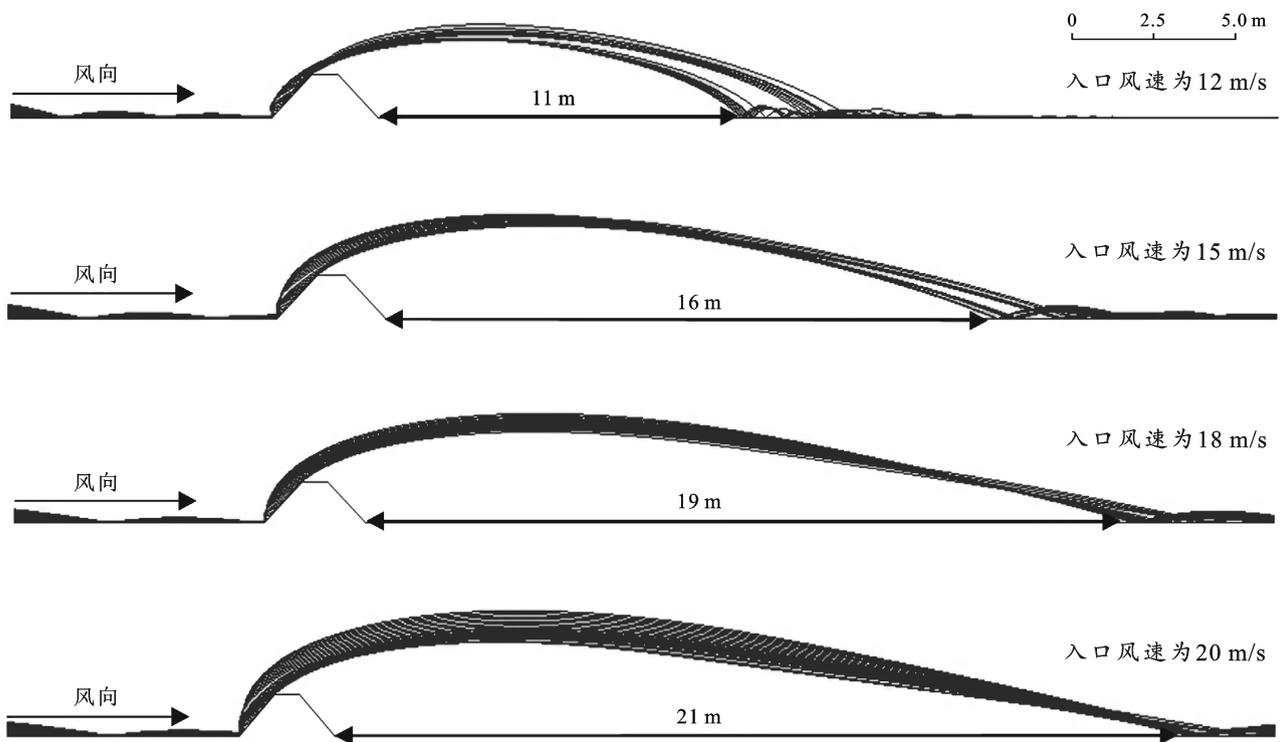


图6 沙粒跃移挡沙堤的轨迹

图6模拟分析中显示翻越挡沙堤的沙粒在风力的作用下,不断与地面进行摩擦、碰撞、反射,直到满足模型中的控制方程的参数设置沙粒的运动停止;在实际情况中沙粒跃移挡沙堤后做抛物线运动到达地面,由于阻力作用运动停止后,在气流扰动条件下仍可能小幅运动,停止点的位置与模拟分析中沙粒下落点稍有偏差,但实际情况与模拟结果相差较小,模拟结果可靠。当风力超过沙粒起动风速的作用力时,新沙源还会对公路上行车安全构成威胁,则需要另一种

固沙措施来保证公路上行车安全。张家口坝上地区金属矿藏丰富,大量尾矿堆积如山,在大风吹蚀下形成危害极大的风沙流,采取“就近消解”的原则,利用尾矿砂制成多孔砖,铺设成方格形式,来增大地表粗糙度,降低成本,起到固定地表流沙的作用。本文在前期研究基础上,采用这种与当地地貌环境相适应的新型固沙沙障——固沙砖。多孔固沙砖是利用水泥固化尾矿砂制备而成,代替之前的草方格、石方格等传统固沙设施,降低施工成本并有效利用固废尾矿,

利用其作为第二道固沙设施。通过离散相模型(DPM)对沙粒跃移挡沙堤的轨迹图(图 6),可以得到,当模型中入口风速在 12~20 m/s 时,沙粒下落位置距离挡沙堤为 11~21 m,即第二道固沙设施。固沙砖沙障相应的铺设范围也是距离挡沙堤 11~21 m,起点到终点的长度为 10 m。

## 2.4 固沙砖沙障参数分析讨论

风沙流经过挡沙堤的阻挡后,翻越挡沙堤的沙粒再次起动,利用固沙砖沙障固定地表流沙。根据笔者在固沙砖制备方面的基础研究<sup>[18]</sup>以及常用多孔砖的规格,选用固沙砖的尺寸为 0.4 m×0.2 m×0.115 m,设置上下两层,高度为 0.4 m,孔隙率为 15%。考虑到不同间距固沙砖内部防风阻沙效果存在差异,故取固沙砖排列间距分别为 0.5, 1.0, 1.5 m 研究对象,且研究第 1 排固沙砖与第 2 排固沙砖内部不同高度处的风沙流速度值对沙障内部积沙效果的分析较有代表性。初始风速为 18 m/s 时,风沙流在经过挡沙堤的阻挡后,在固沙砖方格内部从高度 0~1 m 处,不同间距固沙砖内部风沙流速度值的变化如图 7 所示。

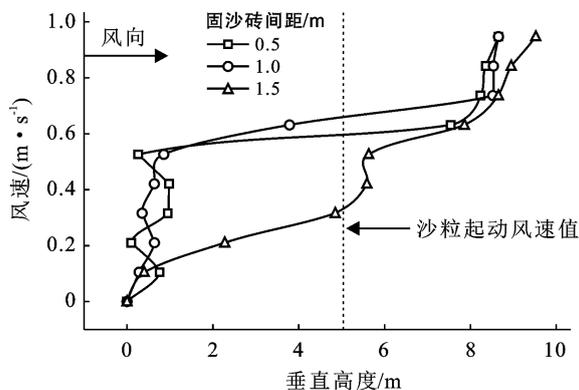


图 7 不同间距固沙砖内部风速变化

由图 7 可知,固沙砖间距分别为 0.5, 1.0 m 时,在 0.5 m 高度以下,风沙流速度值均小于 2 m/s(即小于沙粒起动风速值 5.1 m/s),与 0.5 m 以上的风沙流速度形成的差值超过 7.2 m/s,固沙砖内部与周围风速衰减幅度最高可达 97.3%。当风沙流经过固沙砖的铺设间距为 0.5, 1.0 m 时,在高度 0.5 m 以下,风沙流中沙粒大部分沉积固沙砖内部。当固沙砖的间距为 1.5 m 时,在 0.4 m 以下,由于间距过大,导致风沙流速度最大达到 5.63 m/s,超过了沙粒的起动风速,风沙流中只有少部分沙粒因为碰撞停留在固沙砖方格内部,积沙效果并不理想。综合起来,固沙砖铺设间距分别为 0.5, 1.0 m 时,二者铺设方式的固沙效果相近,但是考虑到材料成本以及安装时需要的人工

费用,故选用铺设间距为 1 m×1 m 的固沙砖,考虑到实际风向有变化,设计将固沙砖铺设成格子状,现场具体的铺设形式如图 8 所示。结合前文通过离散相模型(DPM)对沙粒跃移挡沙堤的运动轨迹研究得出在不同风速下沙粒下落的起止点的范围及距离挡沙堤的距离,固沙砖的起始位置距离挡沙堤背风侧 11 m,铺设成 11 排、间距为 1 m×1 m 的沙障形式。



图 8 固沙砖沙障的铺设形式

## 2.5 综合防风固沙体系积沙效果分析讨论

针对挡沙堤—固沙砖的综合体系,为进一步得出风沙流经过挡沙堤后,固沙砖沙障对风沙流的拦截效果,采用欧拉双相流模型(Eular)对不同风速下固沙砖沙障积沙效果进行了分析。图 9 为挡沙堤后,不同排数的 1 m×1 m 的固沙砖方格内沙粒体积分数分布云图,与文献[25]表示方法类似,不同颜色表示沙粒在空气中所占比例,且图中颜色越接近红色表示沙粒堆积密度越大。从图 9 得出,不同风速下,固沙砖沙障周围积沙迁移规律相似,挡沙堤背风侧后重新起动的沙粒在经过固沙砖沙障时,由于固沙砖沙障的阻碍作用,将会在固沙砖沙障前侧均形成明显的积沙。当风速值分别为 12 和 15 m/s 时,新沙源会在第 1 排固沙砖处沉积较多,当风速值为 15 m/s 时,从图 9 中得出,随着风速的增加沙粒会“爬”上固沙砖向着后面继续移动,而这种现象随着固沙砖排数的增加逐渐削弱;当风速值分别为 18, 20 m/s 时,随着风速增大更多沙粒达到起动风速,因此沙粒的移动现象更加明显,固沙砖方格内部沙粒逐渐增加;结合前文图 8 可以看出,固沙砖间距为 1 m 时,在小于固沙砖高度处的风沙流速度值均小于沙粒起动风速值 5.1 m/s,在第一排与第二排固沙砖周围积沙量较多,与此处得出的结论吻合。因此,风速小于 20 m/s 时,铺设 11 排固沙砖就可以起到良好的固沙效果。

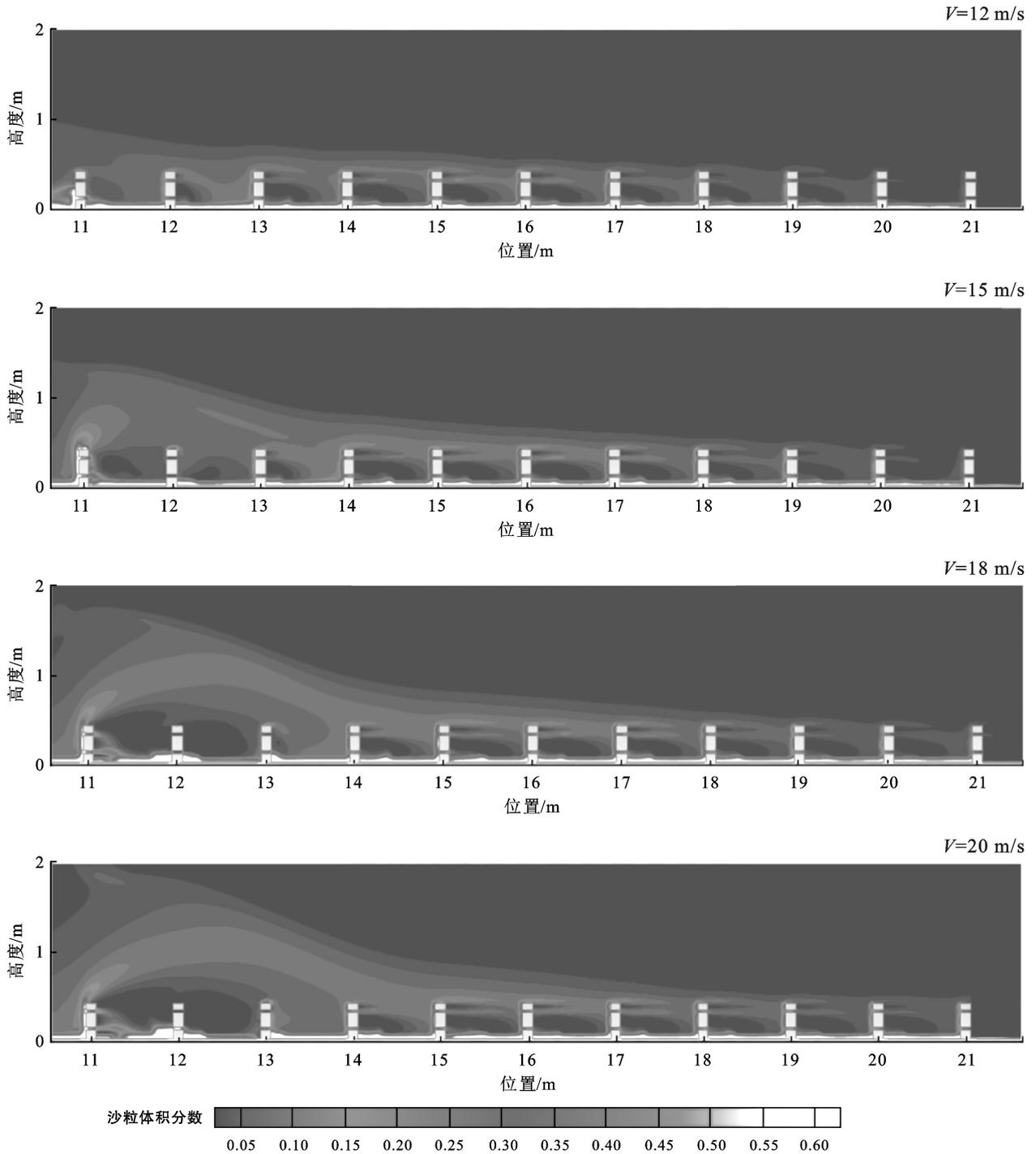


图 9 不同风速下固沙砖内部沙粒体积分数分布云图

### 2.6 挡沙堤—固沙砖综合型防风固沙体系的参数设置

经过离散相模型 (DPM) 和欧拉双相流模型 (Eular) 对翻越挡沙堤沙粒的运动轨迹及固沙砖沙障周围的积沙云图的模拟, 确定了使用挡沙堤—固沙砖综合型体系来防风固沙, 此体系通过“远阻近固”的方式来降低风速、阻挡地表流沙 (如图 10 所示)。其中, “远阻”采用挡沙堤作为第一道屏障, 挡沙堤迎风侧及背风侧均为风速减弱区域, 可使风沙流中的沙粒部分沉积。但挡沙堤背风侧有一段区域是风速恢复区, 该

区域风速可以达到部分沙粒的起动风速, 形成新沙源, 沙粒的再次运动会对路堤造成沙埋等问题。因此, 通过“近固”将固沙砖作为靠近路堤的第二道屏障, 使沙粒在到达路堤之前得到最大幅度的沉积。结合挡沙堤—固沙砖综合防风固沙体系的周围流场分布, 对二者的“远阻近固”效果进行综合分析。挡沙堤—固沙砖综合型防风固沙体系内的沙粒跃移与积沙情况是一个随风速变化的动态过程, 当风速在  $12\sim 20\text{ m/s}$  之间时, 挡沙堤的边坡率为  $1:1.2$  时, 固

沙砖沙障的起始位置与挡沙堤的距离设置为 11 m, 将  $0.4\text{ m} \times 0.2\text{ m} \times 0.115\text{ m}$  的多孔固沙砖铺设成 11 排, 高度为  $0.4\text{ m}$ ,  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的方格形式, 此时防风固沙效果最优。同时, 为了定期清理固沙砖机械沙障后大风季节后的积沙, 将固沙砖沙障终止铺设位置与公路路堤的间距设置为  $2\text{ m}$ 。

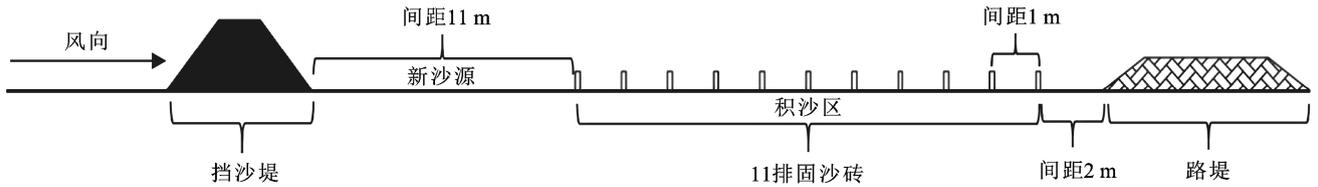


图 10 综合防风固沙体系

### 3 结论

(1) 风沙流经过挡沙堤时会依次形成 4 个区域: 减速区域、加速区域、紊流区域、恢复区域。

(2) 在不同风速下, 通过对挡沙堤迎风侧与背风侧不同高度处风速值的研究, 风沙流经过不同边坡率的挡沙堤时, 风速变化规律大致相同, 当挡沙堤的边坡率为  $1:1.2$  时, 综合防风固沙效果最佳。

(3) 通过离散相模型 (DPM) 研究沙粒跃移挡沙堤后的运动轨迹, 得出不同入口风速经过边坡率为  $1:1.2$  的挡沙堤时, 沙粒的运动轨迹不同, 风速越大沙粒跃移挡沙堤后的落点位置与挡沙堤越远; 入口风速为  $12\sim 20\text{ m/s}$  时, 沙粒的下落大致位置分别距挡沙堤大致为  $11\sim 21\text{ m}$ 。

(4) 在入口风速为  $18\text{ m/s}$  时, 不同间距的固沙砖防风沙效果不同。在间距为  $1\text{ m}$  的固沙砖,  $0.4\text{ m}$  高度内, 内部气流速度衰减最大, 防风固效果最好; 并采用欧拉双相流模型 (Eular) 验证综合防风固沙体系一固沙砖沙障内部固定地表流沙效果。

(5) 当风速为  $12\sim 20\text{ m/s}$  时, 挡沙堤边坡率为  $1:1.2$  时, 固沙砖与挡沙堤的距离设置为  $11\sim 21\text{ m}$ , 铺设成 11 排  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$  的方格形式, 固沙砖与路堤的间距为  $2\text{ m}$ , 挡沙堤一固沙砖综合防风固沙体系可以有效防止翻越挡沙堤沙粒的再次起风, 最大程度降低风沙流对公路路堤的沙埋等问题, 保障行车安全。

#### [ 参 考 文 献 ]

[1] 刘正恩. 河北坝上生态退化现状、原因及对策措施[J]. 生态经济, 2010(1): 166-169.  
 [2] 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.

综上所述, 挡沙堤一固沙砖综合型防风固沙体系中, 因地制宜地使用当地原材料制作挡沙堤和固沙砖, 挡沙堤主要起到降低风速的作用, 并使部分沙粒沉降在两侧; 固沙砖沙障主要起到固定近公路地表流沙的作用, 两部分联合使用, 以发挥最大的防风固沙作用。

[3] 程建军, 智凌岩, 薛春晓. 箱体式活动沙障风沙流场特征[J]. 交通运输工程学报, 2017, 17(5): 61-70.  
 [4] 黄勇. 酒额铁路戈壁风沙流地区沙害成因及防治措施[J]. 铁道标准设计, 2015, 59(7): 32-35.  
 [5] 张凯, 赵沛雯, 张兴鑫, 等. 风速廓线形式对 HDPE 板高立式沙障风沙流场的差异性研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(9): 143-149.  
 [6] 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(5): 139-150.  
 [7] Horvat M, Bruno L, Khri S, et al. Aerodynamic shape optimization of barriers for windblown sand mitigation using CFD analysis [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2020, 197(10): 104058.  
 [8] Li B, Sherman D J. Aerodynamics and morphodynamics of sand fences: A review [J]. Aeolian Research, 2015, 17(11): 33-48.  
 [9] 李晓军, 蒋富强. 风沙流对戈壁地区挡风墙响应规律的数值模拟分析[J]. 铁道标准设计, 2016, 60(3): 47-51, 60.  
 [10] 丁泊淞, 高丽, 程建军, 等. 斜插板式沙障插板倾角影响下风沙流特征的数值模拟[J]. 水土保持通报, 2021, 41(1): 132-137.  
 [11] 张凯, 王起才, 杨子江, 等. 新建格库铁路 HDPE 板高立式沙障防风效益数值模拟研究[J]. 铁道学报, 2019, 41(3): 169-175.  
 [12] Gillies J A, Etyemezian V, Nikolich G, et al. Effectiveness of an array of porous fences to reduce sand flux; Oceano Dunes, Oceano CA [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 168(6): 247-259.  
 [13] Sarah M C, Jeong J K, Sang J L, et al. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 163(1): 6-14.

- security scenario in Shiyang River basin [J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1306-1315.
- [22] 李路, 孙桂丽, 陆海燕, 等. 喀什地区生态脆弱性时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 277-288.
- [23] 马增辉, 马钢. 喀什地区生态环境现状、问题和生态保护修复措施探索[J]. 安徽农学通报, 2019, 25(18): 128-130.
- [24] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [25] 徐自为, 张智杰. 基于土地利用变更调查的 2010—2016 年新疆尉犁县生态系统碳储量时空变化[J]. 环境科学研究, 2018, 31(11): 1909-1917.
- [26] Cong Rui, Qi Juntong, Wu Chong, et al. Multi-UAVs Cooperative Detection Based on Improved NSGA-II Algorithm [C]. 39th Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2020: 1524-1529.
- [27] Fu Jun, Yuan Haikuo, Zhang Depeng, et al. Multi-objective optimization of process parameters of longitudinal axial threshing cylinder for frozen corn using RSM and NSGA-II [J]. Applied Sciences, 2020, 10(5): 1646.
- [28] 朱文博, 张静静, 崔耀平, 等. 基于土地利用变化情景的生态系统碳储量评估: 以太行山淇河流域为例[J]. 地理学报, 2019, 74(3): 446-459.
- [29] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. Landscape Urban Plan, 2017, 168: 94-116.
- [30] Yu Huafei, Zhao Yaolong, Fu Yingchun. Optimization of impervious surface space layout for prevention of urban rainstorm waterlogging: A case study of Guangzhou, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2019, 16(19): 3613.
- [31] 华琳, 黄志霖, 马良, 等. 三峡库区低山丘陵区多尺度景观的指数响应及适宜粒度[J]. 生态学报, 2022(11): 1-15.
- [32] 樊田田, 许蕾, 陈林. 基于多目标优化算法 NSGA-II 推荐相似缺陷报告[J]. 计算机学报, 2019, 42(10): 2175-2189.
- [33] 谢涛, 陈火旺, 康立山. 多目标优化的演化算法[J]. 计算机学报, 2003, 26(8): 997-1003.
- [34] 刘光旭, 王小军, 相爱存, 等. 赣江中上游地区土地利用变化空间分异与驱动因素[J]. 应用生态学报, 2021, 32(7): 2545-2554.

(上接第 144 页)

- [14] Lee S J, Park K C, Park C W. Wind tunnel observation about the shelter effect of porous fences on the sand particale movement [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(9): 1453-1463.
- [15] 崔晓宁, 梁柯鑫, 王起才, 等. 新建格库铁路挡沙堤阻沙机理研究[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(7): 85-92.
- [16] 富宝锋, 王志强, 何艺峰, 等. 沙粒在复合型阻沙措施附近沉积特性数值模拟[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(S1): 438-440.
- [17] 石龙, 李凯崇, 蒋富强, 等. 铁路沿线挡沙堤设计参数优化分析[J]. 铁道建筑, 2017, 57(9): 119-123.
- [18] 王海龙, 刘畅, 孙婧, 等. 沙漠铁路固沙砖设计参数的数值模拟[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 59-64.
- [19] 徐超. 张家口市坝上气候变化特征研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(6): 6-8.
- [20] 赵小虎, 王新军, 李振山. 风力作用下沙粒冲击起动风速分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 53-57.
- [21] 张凯, 王起才, 张兴鑫, 等. 格库铁路 HDPE 板栅栏有效防护距离[J]. 交通运输工程学报, 2020, 20(5): 105-115.
- [22] 谢虎雄, 马发跃, 武生智. 风沙环境中公路风沙灾害的数值模拟[J]. 中国沙漠, 2019, 39(2): 151-157.
- [23] 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.
- [24] 张兴鑫, 张凯, 史博源, 等. 流动沙丘区公路路基风沙流场数值模拟及路面沙害形成机制[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1184-1191.
- [25] 石龙, 蒋富强. 斜插板挡沙墙设计参数优化数值模拟[J]. 中国沙漠, 2014, 34(3): 666-673.