格库铁路不同固沙措施的防护效益

梁柯鑫[1]，王起才[1,2]，崔晓宁[1]，张 凯[1,2]，张戎令[1,2]，杨志冬[3]

(1. 兰州交通大学 土木工程学院，甘肃 兰州 730070；2. 道桥工程灾害防治技术国家地方联合工程实验室，甘肃 兰州 730070；3. 中国铁路青藏集团有限公司格库铁路建设指挥部，青海 格尔木 816000)

摘 要：[目的] 确定格库铁路沿线最佳固沙措施，为沿线固沙措施布设提供理论依据。[方法] 通过流体仿真(ANSYS fluent)模拟格库铁路沿线高密度聚乙烯(high density polyethylene，HDPE)板和固化沙垄方格周围的流场变化、防护距离和积沙形态变化过程。[结果] 当气流通过 HDPE 板和固化沙垄方格时，在其周围形成 6 个速度分区：迎风侧低速区、遇阻抬升区、集流加速区、第 1 减速区、第 2 减速区和速度恢复区；在同等风速条件下，同一高度处固化沙垄方格的有效防护距离大于 HDPE 板的有效防护距离；HDPE 板和固化沙垄方格内的积沙随时间动态变化，透风型 HDPE 板防沙形式以板内固沙为主，不透风型固化沙垄方格以沙垄前阻沙为主。[结论] 综合考虑，HDPE 板方格的经济性实用性以及防沙效果更好。

关键词：HDPE 板；固化沙垄方格；防护距离；积沙

文献标识码：A **文章编号**：1000-288X(2018)05-0300-07 **中图分类号**：U216.41+3

文献参数：梁柯鑫，王起才，崔晓宁，等. 格库铁路不同固沙措施的防护效益[J]. 水土保持通报，2018，38(5)：300-306. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2018.05.048. Liang Kexin, Wang Qicai, Cui Xiaoning, et al. An analysis of protection benefits of different sand-fixing measures at Geku railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(5): 300-306.

An Analysis of Protection Benefits of Different Sand-fixing Measures at Geku Railway

LIANG Kexin[1], WANG Qicai[1,2], CUI Xiaoning[1],
ZHANG Kai[1,2], ZHANG Rongling[1,2], YANG Zhidong[3]

(1. *College of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2. *National and Local Joint Engineering Laboratory for Disaster Prevention and Control Technology of Road and Bridge Engineering, Lanzhou, Gansu* 730070, *Chian*; 3. *Geku Railway Construction Headquarters of China Railway Qingzang Group Co. Ltd, Geermu, Qinghai* 816000, *China*)

Abstract: [Objective] To obtain the best sand-fixing measures along the Geku railway in order to provide a theoretical basis for the deployment of sand-fixing measures along the line. [Methods] The ANSYS fluent numerical simulation was used to study the change of flow field, the protective distance, the sand accumulation process of high density polyethylene (HDPE) board and the hardened sand square grid. [Results] The results showed that when the airflow passed through the HDPE board and hardened sand square grid, six velocity zones were formed including: low air speed zone at windward side, air flow uplift zone, air flow accelerated zone, the first air flow deceleration zone, the second air flow deceleration zone and air flow speed recovery area zone. At the same height, the effective protection distance of hardened sand square grid was greater than that of HDPE board under the same wind speed. The sand accumulation in the HDPE board and hardened sand square grid were dynamic processes. Sand control form of ventilated HDPE board and non-ventilated hardened sand square grid were dominated by sand accumulation and sand resistance. [Conclusion] The economical practicality and the sand control effect of HDPE board were better.

收稿日期：2018-04-09 **修回日期**：2018-05-13

资助项目：中国铁路青藏集团有限公司格库铁路建设指挥部项目“新建铁路格尔木至库尔勒(青海段)工程全线风沙流监测防护”(QZ-GKTL-2017-002)；长江学者和创新团队发展计划滚动项目(IRT_15R29)；甘肃省基础研究创新群体(145 RJIA332)；兰州交通大学(201606)优秀平台项目

第一作者：梁柯鑫(1994—)，男(汉族)，山东省泰安市人，硕士研究生，研究方向为铁路风沙防护。E-mail：lkx19940102@163.com。

通讯作者：王起才(1962—)，男(汉族)，河北省晋州市人，教授，博导，主要从事工程新材料、混凝土结构以及耐久性方面的研究。E-mail：13909486262@139.com。

Keywords: high density polyethylene (HDPE) board; hardened sand square grid; protective distance; sand accumulation

防沙工程,从其作用原理和功能来划分,有固沙措施、阻沙措施和输导措施。固沙措施是阻滞气固两相流在床面上相互作用,固定活动床面;阻沙措施是增大风沙流运动的阻力,阻滞和拦截过境风沙流;输导措施是减少风沙流运动阻力,促进和加速风沙流顺利通过保护区[1]。近半个世纪中国修建的沙漠铁路,固沙措施成为铁路风沙防护体系中不可或缺的方式。1956 年苏联治沙专家彼得洛夫将草方格沙障引进中国[2],并成功应用于包兰铁路防沙工程,开启了草方格固沙的先河。之后经过长期实践,石方格、土方格等也成功应用于铁路固沙,取得了良好的防沙效益。近年来,随着新材料的开发应用,用 HDPE 材料制成的塑料沙障开始逐渐代替传统的草方格等沙障,固沙措施实践应用及其原理研究也逐渐走向成熟。

针对固沙措施,国外专家进行了大量的研究并且取得了丰富的成果[3-7],国内许多学者对于固沙方式及其机理研究同样做出了许多贡献。孙浩等[8]通过大涡模拟方法研究了不同孔隙度沙障嵌固端受力变化;马瑞等[9]对布设于不同沙源供给条件下的草方格沙障、塑料网方格沙障和黏土行列式沙障的输沙量、风沙流结构、沙面形态变化进行了研究;李锦荣等[10]借助 Fluent 对不同规格沙袋沙障近地表气流、风速廓线和防风效能进行了模拟分析;袁鑫鑫等[11]通过风洞试验揭示了不同风速和间距对双排尼龙阻沙网的影响;周娜等[12]利用野外风沙观测和草方格风洞流场模拟,解析了草方格沙障内部凹曲面形成的过程;刘世海等[13]对青藏铁路格拉段高立式沙障的防风固沙效果进行了详细研究;屈建军等[14-17]、张克存等[18]研究了草方格、HDPE 板方格合理防沙尺寸以及防沙机理。综上所述,大部分学者研究主要集中在沙障防沙机理以及参数优化等方面,在 HDPE 板和固化沙垄方格内积沙动态变化方面研究不多。

由于风沙流特征具有明显的地域特征,不同地区的风沙防治措施布设要结合现场实际,因地制宜地建立风沙防护体系。本文拟对新建格库铁路先行风沙防护试验段组装式多周期 HDPE 板固沙土工格和固化沙垄方格,开展数值模拟进行积沙机理以及积沙断面动态形态研究,以期为铁路沿线后期风沙防护措施大规模铺设提供依据。

1　研究区域及防沙工程概况

1.1　研究区概况

格库铁路(青海段)风沙防护试验段(2017 年 3 月建成)位于柴达木盆地南缘西部,起屹里程:DK326+000.00—DK329+000.00,长 3 000 m,分 6 个区段,每个区段 500 m。工程区位于茫崖湖洪积平原,地形较平坦、开阔,局部地形有起伏,地势北高南低,地面高程 3 104～3 239 m;流动沙地呈波浪状,以风积粉细沙为主;年平均气温 2.9 ℃,极端最高 32 ℃,极端最低 −34.3 ℃;年降雨量 44 mm,蒸发量 2 739.3 mm;年均大风(17.2～20.4 m/s)日数 43 d,最大瞬时风速 29.2 m/s,起沙风速 7～10 m/s,年均风沙日数 36 d。用马尔文激光粒度分析仪测得现场自然沙粒径分布主要集中分布在 150～500 μm 范围,砂质不均,有少量砾石。通过计算得到沙粒正态概率曲线,整个样品的粒度分布为 4 条直线,沉积自然沙蠕移组分占19.8%,跃移组分占 76.7%,悬移组分占 3.5%。试验段地表裸露,植被覆盖率小于 10%,主导风向北偏西 50°。没有防护措施时,经过现场调查,主导风向下风沙流对铁路路基主要产生沙埋(舌状沙埋、片状沙埋),另外沙粒沉积在道砟孔隙中,对线路和行车安全危害严重。

1.2　防沙试验工程

选取试验段固化沙垄方格(位于 DK327+000.00—DK327+500.00)和组装式多周期 HDPE 板(位于 DK328+000.00—DK328+500.00)两种固沙措施进行分析。HDPE 板由 1.0 m×1.0 m×0.3 m 的 HDPE 板小单元组装而成每,HDPE 板孔隙形状为方孔(0.5 cm×1.5 cm),孔隙率 50%,10 m×10 m 为一个大单元格,大单元格边采用镀锌矩管立柱(总长 1 m)固定,打入或埋入地面以下 0.5 m,露出地面 0.5 m。后期可以根据积沙情况调整高度,以确保积沙效果。沿铁路方向布设总长度 500 m,垂直铁路迎风侧方向布设 225 m,背风侧方向布设 105 m,中间设置空留带,总布设面积 161 000 m^2。

固化沙垄方格(以下简称沙垄方格)尺寸为 1.0 m×1.0 m×0.3 m(高),坡率为 1∶0.75,方格沙垄采用就地取土填筑,填土需夯实,方格沙垄筑完成后尽快喷洒化学固化剂,沙垄方格的边与主导风向垂直。沿铁路方向布设总长度 500 m,垂直铁路迎风侧方向布设 225 m,背风侧方向布设 105 m,中间设置空留带,总布设面积 161 000 m^2。

2　数值计算模型及计算参数

2.1　几何建模

由于在风场作用下沙粒重力、拖曳力、阻力一般

作用在同一平面内，另外考虑到计算机性能要求，建立二维简化模型。计算流域 3 m×50 m，HDPE 板和沙垄方格距离入口 10 m，将其简化为无厚度壁面，采用结构化网格，对 HDPE 板和沙垄方格 0.5 m 高度范围内进行局部加密。

2.2 边界条件

模型左侧入口为速度入口(velocity_inlet)，右侧出口为出流条件(out_flow)，HDPE 板、沙垄方格以及模型下壁面采用壁面条件(wall)，上壁面采用对称边界条件(symmetry)。

2.3 计算参数

设定风沙流携沙粒径 d_s=0.1 mm，沙粒密度 ρ_s=2 650 kg/m^3；由于地表的风沙流中沙物质颗粒所占容积率都在 5%以下，按照多相流理论为稀相，故初始沙粒相体积分数取为 1%，在此条件下，单一的颗粒球模型是一个很好的近似；空气密度 ρ=1.225 kg/m^3，黏度 μ=1.789 4×10^{-5} Pa/s；因现场一年中 17.2～20.4 m/s 风速天数达到 43 d，所以取其均值，对两种固沙措施进行对比，初始风速与沙粒速度为均匀风速 18 m/s；计算模型采用欧拉双流体模型附加 k－ε 方程，湍流强度 I=3.22%；湍流长度尺度 L=0.127 m；求解过程加入 Syamlal-O'Brien 拖曳力(参照 ANSYS15.0 HELP 中 fluid-solid exchange coffi-cient 部分)。

3 模拟结果与分析

3.1 速度流场变化

图 1 为 HDPE 板与沙垄方格周围速速度变化云图，图 2 为气流经过 HDPE 板与沙垄方格时的速度流线图。

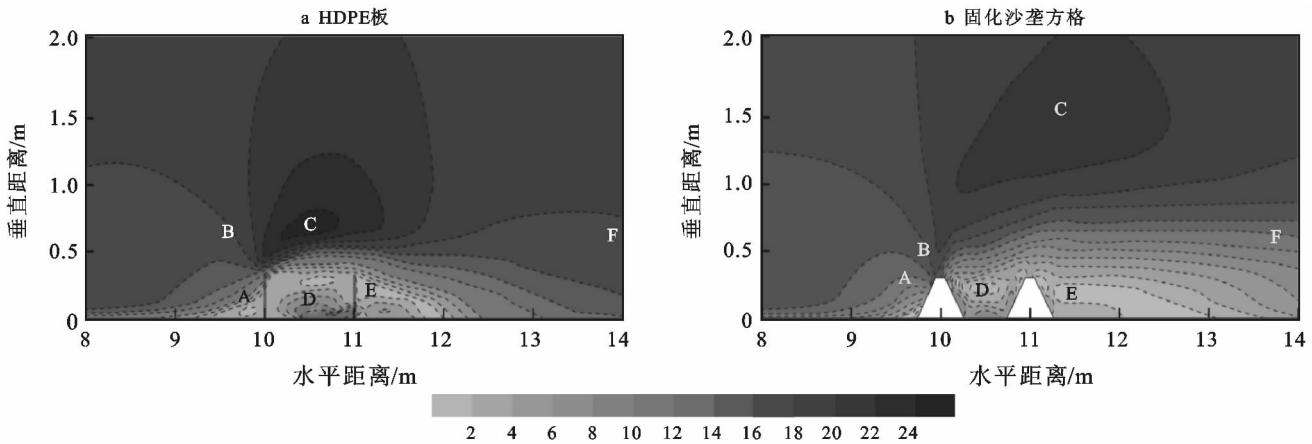


图 1 格库铁路不同固沙措施速度云图

当下方气流经过 HDPE 板和沙垄方格时受到阻碍，在其迎风侧的下方形成了低速区 A。气流则沿着 HDPE 板和沙垄方格向上爬升，形成遇阻抬升区 B(图 1)。抬升过程中气流不断汇聚加速，在 HDPE 板和沙垄方格上方形成集流加速区 C。由于 HDPE 板有孔隙，对气流的抬升汇聚作用效果小于沙垄方格，导致沙垄方格上方加速区规模大于 HDPE 板上方加速区。HDPE 板和沙垄方格对气流汇聚作用使得其上方形成高速区即高压区，而在其后方形成第一减速区 D，也即低压区，压差作用下 HDPE 板和沙垄方格中央形成涡流(图 2)，涡流区流速度降低导致沙粒在此沉降。第一减速区的气流继续前行，同样沿着 HDPE 板和沙垄方格抬升，汇聚加速形成更大的高压区。同样的原理在第二块 HDPE 板和沙垄方格后方形成第二减速区 E，再次形成涡流。因为 HDPE 板的孔隙作用，其中央的旋涡与后方涡流连接到一起，因沙垄方格是密实的，两个涡流是分开的。气流继续前行，通过 HDPE 板和沙垄方格之后失去阻碍作用，集流加速区与第二减速区气流速度逐渐恢复，形成消散恢复区 F。

3.2 HDPE 板与固化沙垄方格防沙效益

3.2.1 HDPE 板与固化沙垄方格防护距离 图 3a 为水平方向不同高度 HDPE 板周围的速度变化，图 3b 为水平方向不同高度沙垄方格周围速度变化。对于 HDPE 板和沙垄方格，降风效应是评价其防护效果的直观指标之一，按照风速恢复到来流风速的 80%的位置到 HDPE 板和沙垄方格的距离作为有效防护距离。

水平方向速度变化体现了 HDPE 板和沙垄方格控制气流减速的效果。由图 3a 可以看出，对于 HDPE 板，在 0.3 m 高度处有效防护距离为 2.6 m，在 0.4 m 高度处有效防护距离为 1.85 m，在 0.5 m 处对应第一块 HDPE 板的位置速度发生突变，从速度云图(图 1)不难发现其处于集流加速区，在此高度 HDPE 板已经失去防护效果。0.3 m 高度处速度最

低值位置出现在 10.1 m 处,0.4 m 高度处速度最低点位置出现在 10.95 m 处。HDPE 板后风速最低值并不是出现在板后的零距离处,而是有一定的滞后距离,随着高度增加滞后距离增大。

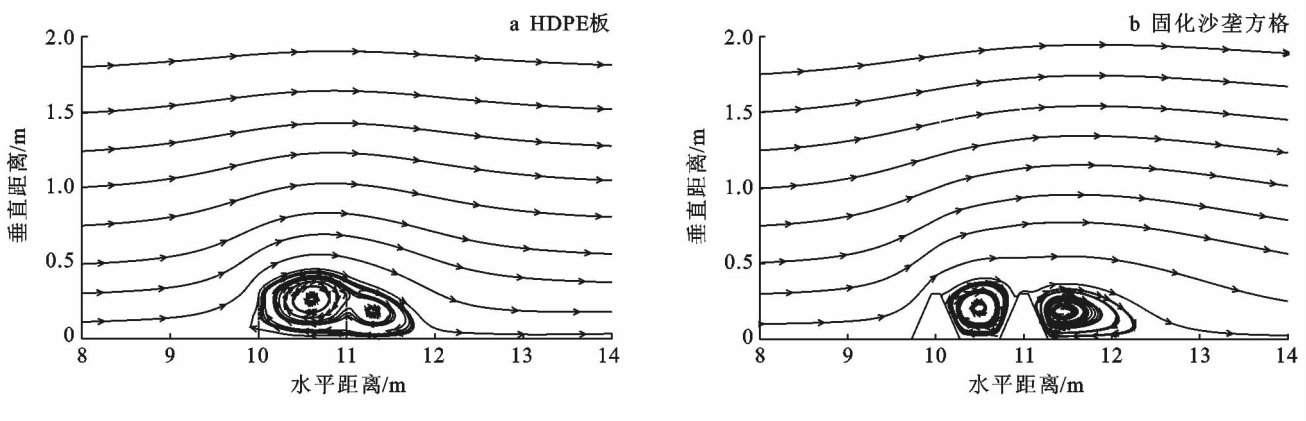
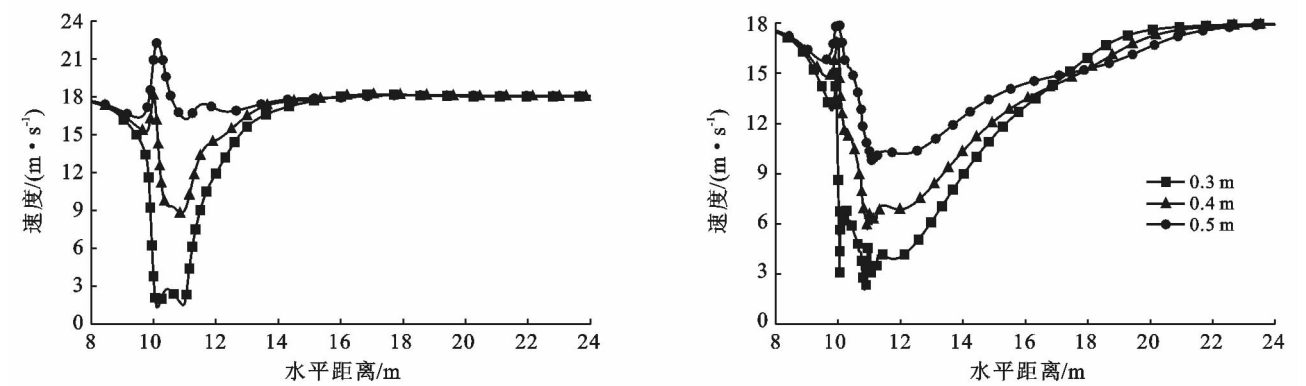


图 2　格库铁路不同固沙措施速度流线

由图 3 可见,沙柴方格在 0.3 m 处有效防护距离为 6.4 m,在 0.5 m 高度处有效防护距离为 5.45 m。0.3 m 高度处速度最低值出现在 10.8 m 处,0.4 m 高度处速度最低值出现在 10.95 m 处,0.5 m 高度处速度最低值出现在 11.05 m 处。与 HDPE 板一样,不同高度速度最低值也是有一定滞后距离。

在同一风速下,可以明显看出沙柴方格的有效防护距离大于 HDPE 板的有效防护距离。0.5 m 高度处 HDPE 板方格已经处于集流加速区,沙柴方格仍有防护作用,防护高度大于 HDPE 板的防护高度。



a 水平方向不同高度 HDPE 板周围速度变化　　b 水平方向不同高度沙柴方格周围速度变化

图 3　格库铁路不同固沙措施周围速度变化

3.2.2　*HDPE 板与沙柴方格固沙效果*　HDPE 板方格和沙柴方格的阻沙原理,主要是风沙流经过 HDPE 板和沙柴方格时,在阻滞作用下形成沙梗,并在其中心部位产生沙面侵蚀,在沙粒分选作用下形成光滑稳定的凹曲面[2]。本文通过 ansys fluent 有限元软件模拟 HDPE 板和沙柴方格在风沙流作用下积沙断面形态变化的过程。

图 4 为 HDPE 板方格沙障在不同时刻的沙粒体积分数云图,图中颜色越深表示积沙越多,红色表示积沙已经稳定堆积,其余颜色指沙粒已经沉降于地表但还未形成稳定积沙。

由图 4 可见,t=10 s 时在 HDPE 板中间以及第二块 HDPE 板背风侧有少量积沙,没有形成凹曲面。随着风沙流继续发展,t=25 s时 HDPE 板方格沙障中间已经开始初步形成凹曲面,凹曲面最低点积沙厚度约为 4.2 cm,右侧沙梗最高为 14 cm,凹曲面风蚀深度(沙梗最高点与凹曲面最低点之差)和边长呈现出 1∶10.2 的关系,且第二块 HDPE 板背风侧积沙增多。t=70 s 时 HDPE 板沙障内凹曲面形态更加明显,最低点积沙厚度为7 cm,右侧沙梗最高为 17.8 cm,凹曲面风蚀深度和边长呈现出 1∶9.26 的关系。事实上,t=70 s 之后随着风沙流继续发展,HDPE 板方格沙障内积沙形态不再发生变化,固沙作用失效。

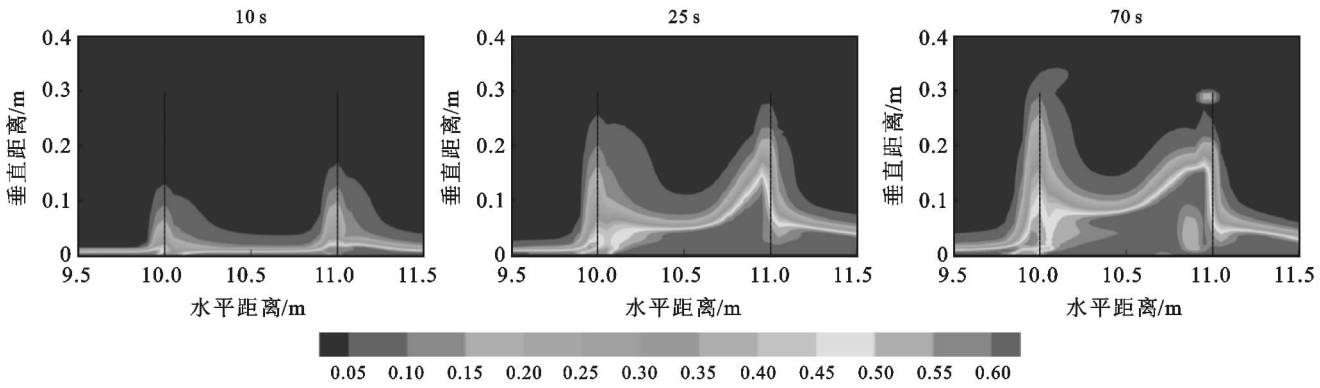


图 4 格库铁路 HDPE 板沙粒体积分数云图

图 5 为沙垄方格在不同时刻的沙粒体积分数云图。如图 5 所示，在库格铁路研究区域内，随着风沙流的发展，当 $t=10$ s 时，在第一个沙垄迎风侧形成少量积沙，沙垄方格中间积沙量非常少。在 $t=25$ s 时，第一个沙垄迎风侧积沙没有明显增多，沙垄方格中间积沙开始增多，积沙平均厚度约为 2 cm，但是没有形成凹曲面。在 $t=70$ s 时，沙垄方格中间积沙比较明显，左侧沙梗高度为 5 cm，右侧沙梗高度为12 cm。此后，沙垄方格内积沙量不再变化，沙垄方格固沙作用失效。

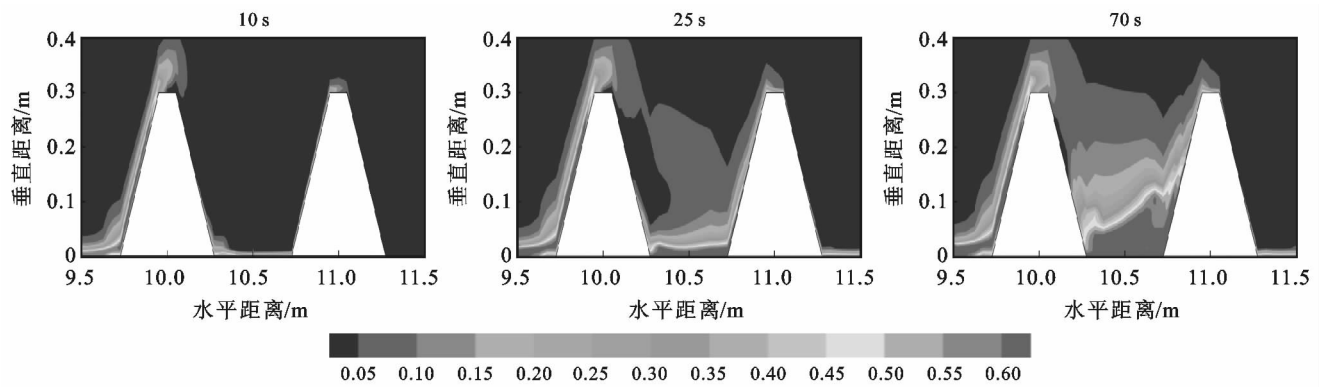


图 5 格库铁路沙垄方格沙粒体积分数云图

HDPE 板方格沙障和沙垄方格沙障内的积沙形态随时间呈动态变化过程，在同等条件下 HDPE 板内积沙多于沙垄方格内积沙，所反映的固沙效果 HDPE 板要好于沙垄方格。当 HDPE 板方格沙障内积沙达到一定高度失去防沙作用时，可将 HDPE 板向上提升使其继续发挥作用。对于沙垄方格来说，积沙达到一定量时需要人工清沙，但清沙过程会破坏沙垄方格，从这一点来说，HDPE 板方格沙障实用性更好。

3.2.3 *HDPE 板与沙垄方格积沙量计算* 定量描述 HDPE 板方格与沙垄方格沙障内积沙量的变化，首先需要建立 HDPE 板方格和沙垄方格内积沙曲面的方程式。但实际情况下积沙断面是一个空间曲线，计算方程式的准确表达比较困难。本文将 HDPE 板方格和沙垄方格内积沙断面简化为二维曲线，通过对其积分得到积沙量计算公式。使用得到的公式对现场方格内积沙进行计算。

HDPE 板方格和沙垄方格内积沙断面曲线 $L(x)$ 可通过分段抛物函数相加得到。假设 $L(x)$ 在空间沿着 z（HDPE 板的宽度）方向为常函数，则函数变成 $L(x,z)$。另外设定沙子的密度为 $\rho_s=2\ 650\ \mathrm{kg/m^3}$，对 $L(x,z)$ 进行积分则得到 HDPE 板内积沙量。

在实际现场需要人工测得积沙断面曲线上的控制点的相对坐标，现给出一般公式：

$$L(x)=\sum_{k=0}^{2} y_k \frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)} \tag{1}$$

其中：

$$\begin{cases} \omega_{n+1}(x)=\prod_{i=0}^{2}(x-x_i) \\ \omega_{n+1}'(x)=\prod_{i=0,i\neq k}^{2}(x_k-x_i) \end{cases} \tag{2}$$

对其进行积分得到：

$$Q_s=\int_0^W\int_S^T\sum_{j=1k=0}^{m}\sum^{2} y_k \frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z \tag{3}$$

式中：S 和 T——HDPE 板方格内现场测得每段积沙断面曲线的相对起始值与终点值；W——HDPE 板

方格宽度(m);m——HDPE 板方格内积沙断面曲线函数段数。

图 6 为 HDPE 板固沙作用失效时板内积沙断面图。

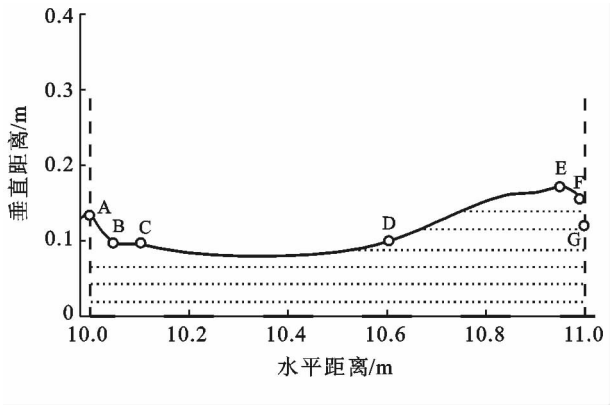


图 6　格库铁路 HDPE 板方格沙障内积沙断面

图 6 中横纵坐标代表 HDPE 板方格及积沙在整个模拟流场中的实际位置。在 HDPE 板方格内积沙断面曲线上取 7 个控制点(取小数点后两位),为方便计算,将 A 点坐标定为(0,0.13),以此类推 B(0.05,0.09),C(0.1,0.(1),D(0.6,0.12),E(0.95,0.18),F(0.99,0.16),G(1,0.12)。整个断面曲线可以由 3 条曲线构成,A,B,C 这 3 点构成 $L_1(x)$,C,D,E 这 3 点构成 $L_2(x)$,E,F,G 这 3 点构成 $L_3(x)$,3 条曲线相加得到积沙断面曲线,代入公式得到:

$$Q_s=\int_0^1\int_S^T\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=0}^{2}y_k\frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z \tag{4}$$

模拟结果,HDPE 板固沙作用失效时方格内总积沙量为 323.21 kg。

对于沙垄方格,还要知道沙垄最低点相对坐标,计算方法同上述一样,对于沙垄方格进行积分时,需要减去多于积分面积(倾斜部分),得到积沙量:

$$\begin{aligned}Q_S=&\int_0^W\int_S^T\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=0}^{2}y_k\frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z-\\&\int_0^W\int_0^U\sum_{k=0}^{1}y_k\frac{\omega_{n+1}(k)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z-\\&\int_0^W\int_0^V\sum_{k=0}^{1}y_k\frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z\end{aligned} \tag{5}$$

式中:S 和 T——在现场沙垄方格内测得每段积沙断面曲线的相对起始值与终点值;W——沙垄方格的宽度;m——沙垄方格内积沙断面曲线函数段数。U 和 V——沙垄方格内积沙左右两侧最高点沙梗到沙垄最低点的水平距离(m)。

图 7 为固化沙垄方格固沙作用失效时方格内积沙断面图。

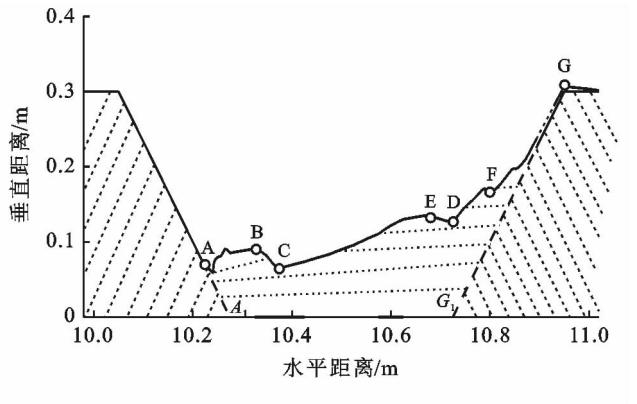


图 7　格库铁路固化沙垄方格内积沙断面

图 7 中横纵坐标代表沙垄方格以及积沙在整个模拟流场中的实际位置,在沙垄方格在整个断面曲线上取 7 个点,将 A 点设为(0,0.07),则 B(0.1,0.09),C(0.15,0.06),D(0.45,0.13),E(0.51,0.11),F(0.58,0.16),G(0.72,0.(3),另外计算得到 A_1(0.06,0),G_1(0.5,0),将其带入公式得到固沙作用失效时沙垄方格内总积沙 Q_S,结果为 155.41 kg。

$$\begin{aligned}Q_S=&\int_0^1\int_S^T\sum_{j=1}^{3}\sum_{k=0}^{2}y_k\frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z-\\&\int_0^1\int_0^{0.06}\sum_{k=0}^{1}y_k\frac{\omega_{n+1}(k)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z-\\&\int_0^1\int_0^{0.5}\sum_{k=0}^{1}y_k\frac{\omega_{n+1}(x)}{(x-x_k)\omega_{n+1}'(x_k)}\mathrm{d}x\mathrm{d}z\end{aligned} \tag{6}$$

3.2.4　HDPE 板与沙垄方格蚀积量变化　算出积沙量之后,通过下列公式可以计算 HDPE 板和沙垄方格内积沙的蚀积量:

$$\Delta=Q_{S1}-Q_{S2} \tag{7}$$

在一定时间间隔内,如果 $\Delta>0$ 说明在这一段时间内发生了风积,如果 $\Delta<0$ 说明在这一段时间内发生了风积,如果 $\Delta=0$ 说明在这一段时间间隔方格内积沙处于动态平衡。

自 2017 年 4 月份开始,按照上文给出的公式,对该区域迎风侧选定的 HDPE 板方格和固化沙垄方格内的沙子重量进行计算记录,然后取平均值,记录间隔为 2 个月,持续时间 1 a(表 1)。

表 1　格库铁路固沙方格内沙子蚀积量变化

时 间	HDPE 板内		沙垄方格内		主导风向
	积沙量/kg	蚀积量	积沙量/kg	蚀积量	
201704—201705	27.8	27.8	15.35	15.35	WNW
201706—201707	40.15	12.35	21.02	5.67	NW
201708—201709	43.71	3.56	23.71	2.69	WNW
201710—201711	41.68	−2.03	20.66	−3.05	SW
201712—201701	45.35	3.67	22.91	2.25	WNW
201802—201803	64.14	18.79	35.73	12.82	WNW

由表 1 可以看出 201704—201705，201708—201709，201712—201801，201802—201803 这 4 个时间段内，在 WNW 主导风向下 HDPE 板积沙为 27.8，3.56，3.67 和 18.79 kg，固化沙垄方格内积沙为 15.35，2.69，2.25 和 12.82 kg，都发生了风积现象。在 NW 主导风向作用下，HDPE 板和固化沙垄方格内同样发生了风积现象，对应时间段内 HDPE 板内积沙量明显多于固化沙垄方格内积沙。在 SW 主导风向作用下 HDPE 板内和固化沙垄方格内积沙分别为－2.03 和－3.06 kg，固化沙垄方格风蚀严重。从 2017 年 4 月份到 2018 年 3 月份，HDPE 板和固化沙垄方格内总的积沙分别为 64.14 和 35.73 kg。上文通过数值模拟计算出 HDPE 板与固化沙垄方格防沙作用失效时方格内积沙分别为 323.21 和 155.41 kg，以此推算 HDPE 板和固化沙垄方格的有效防护持续时间分别约为 5 a 和 4 a。

4 结 论

(1) 当气流通过 HDPE 板和固化沙垄方格时，在其周围形成 6 个速度分区，分别为迎风侧低速区、遇阻抬升区、集流加速区、第 1 减速区、第 2 减速区和速度恢复区。

(2) 在同等风速条件下，同一高度处固化沙垄方格的有效防护距离大于 HDPE 板的有效防护距离；HDPE 板和固化沙垄方格风速最低点并不是出现在 HDPE 板或固化沙垄方格后的零距离处，而是有一定的滞后距离，高程越大，滞后距离越大。

(3) HDPE 板方格和固化沙垄方格沙障内的积沙断面形态随时间动态变化。固沙作用失效时，HDPE 板方格内积沙量多于固化沙垄方格；在方格沙障防沙形式上，透风型 HDPE 板方格沙障以板内固沙为主，不透风型固化沙垄方格以沙垄前阻沙为主。

(4) 建立了计算 HDPE 板方格和固化沙垄方格沙障内积沙量定量计算公式，可定量计算 HDPE 板方格和固化沙垄方格沙障内的蚀积量。通过现场观测，计算出 HDPE 板和固化沙垄方格的有效工作时间分别为 5 a 和 4 a。综合考虑，HDPE 板方格的经济性实用性以及防沙效果更好。

[参 考 文 献]

[1] 刘贤万. 试验风沙物理与风沙工程学[M]. 北京：科学出版社，1995：122.

[2] 吴正等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 科学出版社，北京，2010：319-321.

[3] Bruno L, Fransos D, Giudice A L. Solid barriers for wind-blown sand mitigation: Aerodynamic behavior and conceptual design guidelines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, 173: 79-90.

[4] Zaghloul N A. Sand accumulation around porous fences [J]. Environmental Modelling and Software, 1997, 12 (2): 113-134.

[5] Mcclure S, Kim J JSang J L, et al. Shelter effects of porous multi-scale fractal fences[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 163: 6-14.

[6] 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: 247-259.

[7] Lee S J, Park K C, Park C W. Wind tunnel observation about the shelter effect of porous fences on the sand particle movement [J]. Atmospheric Environment, 2002, 36(9): 1453-1463.

[8] 孙浩，刘晋浩，黄青青. 沙障风荷载作用下嵌固端受力分析[J]. 农业工程学报，2017，33(2)：148-154.

[9] 马瑞，刘虎俊，马彦军，等. 沙源供给条件对机械沙障固沙作用的影响[J]. 水土保持学报，2013，27(5)：105-108.

[10] 李锦荣，孙保平，高永，等. 基于空气动力学的沙袋沙障气流场模拟[J]. 北京理工大学学报，2010，30(6)：749-752.

[11] 袁鑫鑫，王海峰，雷加强，等. 不同间距双排尼龙阻沙网防风效应的风洞模拟[J]. 中国沙漠，2016，36(5)：1238-1246.

[12] 周娜，张春来，田金鹭，等. 半隐蔽式草方格沙障凹曲面形成的流场解析及沉积表征[J]. 地理研究，2014，33 (11)：2145-2156.

[13] 刘世海，冯玲正，许兆义. 青藏铁路格拉段高立式沙障防风固沙效果研究[J]. 铁道学报，2010，32(1)：133-136.

[14] Qu Jianjun, Zu Ruiping, Zhang Kecun. Field observations on the protective effect of semi-buried checkerboard sand barriers[J]. Geomorphology, 2007, 88(1/2): 193-200.

[15] 屈建军，喻文波，秦晓波. HDPE 功能性固沙障防风效应试验[J]. 中国沙漠，2014，34(5)：1185-1193.

[16] 屈建军，井哲帆，张克存，等. HDPE 蜂巢式固沙障研制与防沙效应试验研究[J]. 中国沙漠，2008，28(4)：599-604.

[17] 屈建军，凌裕泉，俎瑞平，等. 半隐蔽格状沙障的综合防护效益观测研究[J]. 中国沙漠，2005，25(3)：329-335.

[18] 张克存，俎瑞平，方海燕. 不同孔隙度尼龙网格对风沙流减弱作用的风洞模拟[J]. 水土保持学报，2004，18 (4)：4-6.