

尼龙网方格沙障的风沙流颗粒分布特征

黎小娟^{1,2}, 李宁³, 周智彬¹, 丁新原⁴, 鲁晶晶¹, 李生字¹

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 新疆建设兵团水保监测总站, 乌鲁木齐 830011; 4. 北京师范大学资源学院, 北京 100049)

摘要: 为了探讨塔克拉玛干沙漠腹地风沙流结构特征及尼龙网方格沙障对风沙流颗粒的分异作用, 于2015年4月—2015年6月, 选取裸沙地和沙障2种下垫面, 利用集沙仪对地表风沙流进行观测, 分析了尼龙网沙障对风沙流结构和沙粒粒径分布的分异过程。结果表明: (1) 风沙流结构在裸沙地符合指数分布($y = 321.025e^{-10.16x}$, $R^2 = 0.94$), 在沙障前部和中部分别表现出“象鼻”效应特征和近似于倒置的“象鼻”; 沙障的设置, 明显减少了近地面(0~42 cm)的输沙量。(2) 在裸沙地, 极细沙和粗粉沙输沙量在垂向分布上符合指数递减规律; 极细粉沙、细粉沙和中粉沙的输沙量在下段呈指数递增分布, 在上段呈指数递减分布, 经过沙障后, 近地面约0~32 cm高度范围内沙粒的输沙量垂向分布特征发生了显著变化。(3) 沙障的设置不仅改变了风沙流的水平分布, 也改变了不同粒径沙粒的水平分布, 其中细沙的水平分布变化最显著。

关键词: 尼龙网方格沙障; 风沙流结构; 塔克拉玛干沙漠; 沙粒粒径

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2016)05-0128-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2016.05.022

Characteristic of Sand Flux Structure and Sand Particle Size Distribution Based on Nylon Net Checkerboard Barrier

LI Xiaojuan^{1,2}, LI Ning³, ZHOU Zhibin¹, DING Xinyuan⁴, LU Jingjing¹, LI Shengyu¹

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*; 3. *Production and Construction Corps of Xinjiang, Soil and Water Conservation Monitoring Station, Urumqi 830011*; 4. *College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100049*)

Abstract: Sand flux structure, the distribution of sediment runoff in the vertical height, was the product of the combined effects including the mechanical composition of sand, the degree of sorting, the feature of near surface airflow, the air humidity, the underlying form, the structure of vegetation, and so on. It could directly characterize the movement of sand, analyze the situation of surface erosion and deposition, master the morphological development and evolution of aeolian landform. It played an important role in the theory and practice. Based on those, it was very necessary to carry out the characteristics of sand motion in the hinter land of Taklimakan desert. In order to reveal two-dimensional spatial distribution of the sand flow and the sand of different particle, bare sandy land and sand barriers were selected. Two kinds of sand collectors (one was set to observe sand flow in the vertical height, the other was set to observe sand flow in the horizontal direction) were installed to measure the features of sand flow movement. In-situ observation was performed from April 2015 to June 2015. Then differentiation process between sand flux structure and sand particle size distribution and nylon net checkerboard barrier were researched. The results were as follows: (1) The sand flux structure exhibited an exponential decay distribution at the bare sandy land, took on unique effect of elephant nose in the front of the barrier and exhibited obsequent effect of elephant nose in the middle of the barrier. Sand-barrier obviously reduced the sand transport rates of the near-surface (0~42 cm). (2) At the bare sandy land, the vertical mass flux profiles of the very fine sand and coarse silt groups exhibited exponential decay distribution, the vertical mass flux profiles of silt, fine silt and the very fine silt exhibited exponential increase distribution with appearing exponential decay distribution in the away-bed region. Going across the sand bar-

收稿日期: 2016-04-21

资助项目: 水利部公益性行业科研专项(201401049); 国家自然科学基金项目(41030530, 41271341); 塔里木油田分公司综合项目(971012080007)

第一作者: 黎小娟(1990—), 女, 硕士研究生, 主要从事生态恢复方面的研究。E-mail: 249817485@qq.com

通信作者: 李宁(1964—), 男, 高级工程师, 主要从事水土保持方面的研究。E-mail: btggsy@126.com

rier, the vertical mass flux profiles of sand and the vertical distribution patterns of sand had changed in the near-bed region (0~32 cm). (3) Sand barrier not only changed the spatial distribution of the sand flow, but also changed the spatial distribution of different size sand. All of those, the spatial distribution of fine sand had change the most.

Keywords: nylon net checkerboard barrier; sand flux structure; Taklimakan desert; sand particle size

风沙流结构是指气流搬运沙粒在高度层上的分布^[1]。其能直接表征沙粒的运动形式,判断地表的侵蚀状况,掌握风成地貌的形态发育及演变规律,在风沙防治的理论和实践中占有重要地位^[2]。自 Bagnold^[3] 研究风沙流结构以来,国内外学者对此做了大量研究^[4-5],且成果显著。目前,针对输沙通量垂向分布的研究主要集中在两个方面,包括风沙流中所有粒径沙粒总输沙量的垂向分布规律和不同粒径沙粒的输沙量垂向分布规律。针对前者的研究发现,不同下垫面的风沙流结构,其输沙量垂向分布模型主要分为 3 种:指数递减分布^[6-8]、偏离指数分布^[9]和“象鼻”效应^[10-12]。对于后者,冯大军等^[13]在非均匀沙床面上,研究了不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布;董玉祥等^[14]探讨了海岸沙丘风沙流中不同粒径组沙粒输沙量的垂向分布模式,发现不同粒径组沙粒的输沙量具有不同的垂向分布特征。同时,风速^[15]、输沙量^[16]等均会对不同粒径组沙粒输沙量的垂向分布产生影响,且沙丘表面不同粒径沙粒的垂向分布特征因部位不同而有所差异^[17]。前人主要集中在较短时间尺度内 0~30 cm 高度范围内粗粒径沙粒的分布,对于长期野外观测条件下,细粒径沙粒在 100 cm 高度内的垂向分布模式的研究鲜有涉及。此外,关于不同沙粒粒径水平分布规律以及风沙流结构对沙障响应机制的研究却较少。

基于此,本文以塔克拉玛干沙漠腹地为研究区域,以野外实地观测试验数据为基础,揭示所有沙粒和不同粒径沙粒的二维空间分布特征,探讨尼龙网沙障的设置对风沙流中所有沙粒和不同粒径沙粒空间分布的影响,以弥补尼龙网沙障对沙漠腹地沙粒粒径分布影响研究的不足,为荒漠化地区精准防沙防尘和合理布设沙障提供科学指导。

1 试验设计

1.1 试验区概况

试验区位于塔克拉玛干沙漠腹地的塔克拉玛干沙漠研究站(83°40'E,39°00'N,海拔 1 099.3 m)东南方向约 3 km 处的一垄间平沙地。塔克拉玛干沙漠地处欧亚大陆腹地,降水稀少,蒸发极其强烈,空气十分干燥,且日照时间长,昼夜温差大,属于极端干旱区。该地区多年平均气温为 13.6℃,气温年较差值约 39.0℃,极端最高气温可达 46.0℃,极端最低气

温达 25.0℃;平均年降水量仅约 25.9 mm,而年平均蒸发量则高达 3 812.3 mm。同时,该区风沙天气频繁,年平均风速在 2.0 m/s 左右,其中春季、夏季风速略高,平均风速在 3.5 m/s 左右,年大风平均日数为 10.5 d,风向以偏东北和偏西北风为主;年扬沙平均日数为 59.6 d,年沙尘暴平均日数为 15.8 d^[18]。

1.2 试验方法

1.2.1 沙通量数据的采集 根据试验区的主风向、沙障规模(50 m×50 m×20 cm)和沙障规格(1 m×1 m),在裸沙地(距离尼龙网方格沙障边缘 30 m 处)、沙障前部(垂直于主风向的沙障边缘,即第一行尼龙网方格内)和沙障中部(垂直于主风向并距沙障边缘 25 m 处)3 个观测位置,分别布设 3 个方口集沙仪(依次标记为:L1,L2,L3)和 3 个全方位集沙仪(依次标记为:T1,T2,T3),如图 1 所示。其中,全方位定点集沙仪高 40 cm,集沙盒按 16 个方位排列,进沙口 25 层,宽和高分别为 1.5 cm 和 2.0 cm,可收集不同方位的跃移沙粒;方口集沙仪用于监测 0~100 cm 的风沙流特征,共 50 层,集沙盒进沙口规格为 2 cm×2 cm,呈 45°方位角(根据试验区的主导风向设定)。

安装仪器时(2015 年 4 月),保证集沙仪下口底部与地面平齐,集沙口正对主风向;观测开始时,同时打开各个集沙仪的口盖;观测结束后(2015 年 6 月),记录持续时间并同时关闭各个集沙仪的口盖。采集样品时,采用特制牛皮纸袋分层(以 2 cm 高差为梯度)收集距近地表 0~100 cm 范围内的沙粒,并做好标记。将样品带回实验室,烘干并用精度为 0.001 g 的 BSA423S 电子天平称重,计算各高度层的输沙率。样品粒径分析采用 BT-2001 型激光粒度分布仪(2015 年 12 月),并根据温德华分级标准(分级单位:μm)对样品粒度进行分级。

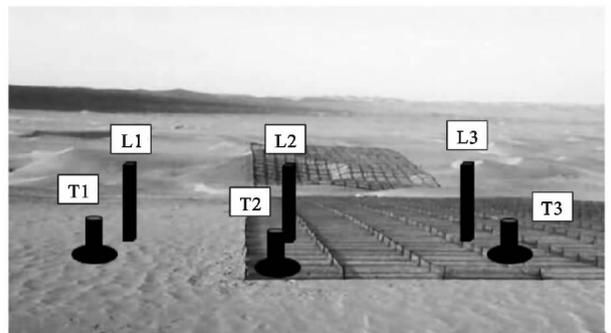


图 1 集沙仪布设图

1.2.2 风速数据的采集 采用 Kestrel 4500 手持风速仪,依次在沙障前裸沙地、沙障前部、沙障中部、沙障后部(垂直于主风向且距沙障边缘 50 m 处)和沙障后裸沙地(垂直于主风向且距沙障边缘 80 m 处)分别测定距沙面 20,50,80,120,150 cm 高度处的风速。观测时(2015 年 4 月—2015 年 6 月的 7 次沙尘天气)打开叶轮盖正对上风向,并切换到风速显示界面,保持仪器处于垂直状态。观测时间持续为 24 h。

1.3 数据处理

利用 Excel 2013 对沙障不同位置的输沙量随高度的变化的数据进行预处理,并利用 Origin 9.0 进行函数拟合。利用 Origin 9.0、Photoshop CS 3 和 Powerpoint 2013 绘制图形。

2 结果与分析

2.1 风沙流的结构特征

由图 2 可知,3 个观测点的风沙流垂向分布规律差异显著,且从裸沙地到沙障前部各高度层输沙量逐渐减少。其中,裸沙地(L1)的输沙量随着高度增加总体呈下降趋势,在 0~42 cm 高度范围内,输沙量随高度的增加迅速下降,42 cm 以上输沙量变化趋于平缓;沙障前部(L2)的输沙量随高度增加呈先增加后减少的趋势,在 0~24 cm 高度范围内随高度增加迅速增加,24 cm 以上输沙量随高度的增加迅速下降;而沙障中部(L3)处的输沙量随高度增加先减少后趋于稳定,输沙量在 0~12 cm 高度范围内迅速减小,12 cm 以上变化趋于平缓,各高度层输沙量呈缓慢上升趋势。

通过拟合分析发现,裸沙地(L1)处 0~100 cm 高度范围内的风沙流结构符合指数递减分布($y = 321.025e^{-10.16x}$, $R^2 = 0.94$);沙障前部(L2)处的风沙流结构表现出明显的“象鼻”效应特征,其中在近地面 0~24 cm 高度范围内偏离指数分布,而在 24~100 cm 高度范围内符合指数递减分布;沙障中部(L3)的风沙流结构在近地面 0~12 cm 高度范围内呈指数递减分布,在 12~100 cm 高度范围内则偏离指数分布,整体上看,近似于一个倒置的“象鼻”。因此,尼龙网方格沙障的设置,改变了输沙量垂向分布形态,明显削减了近地面(0~42 cm)的输沙量。本文研究与何清等^[18]对塔中平坦裸沙地的风沙流结构特征研究的结果相符,但与沙障前部和沙障中部的风沙流特征完全不同,这与下垫面不同有关。

当风沙流进入沙障时,受到沙障阻挡,导致沙障前部(L2)近地面处的输沙量剧烈增加,而越深入沙障内部,近地表被阻挡的沙量越多,进入到沙障中部(L3)的量进一步减少,故其近地表输沙量相对很低。同时,随着深入沙障内部,风力不断减弱(图 3),风沙流中粒径较小的颗粒(粘土),在沙障中部(L3)的输

沙量明显增多(如图 4),因此,沙障中部 12~100 cm 高度范围内的输沙量波动很小。

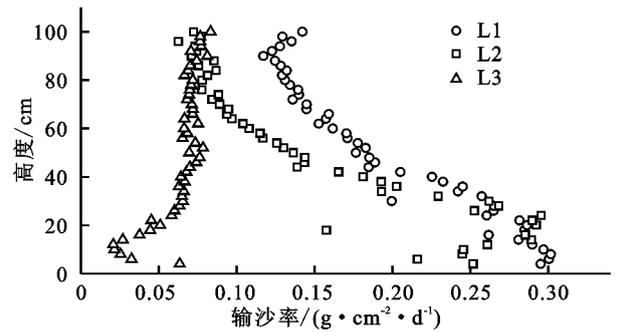


图 2 不同观测点的风沙流垂向分布规律

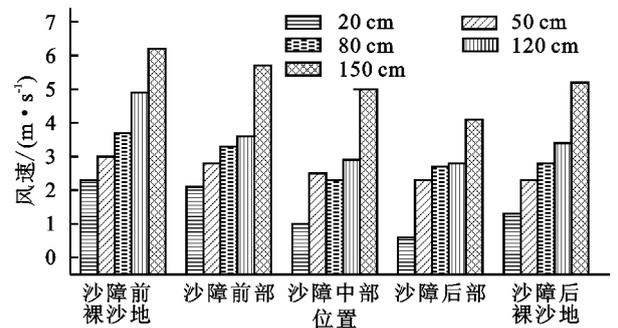


图 3 不同观测点各高度的风速变化

2.2 不同粒径风沙流颗粒的垂直空间分布特征

由图 4 可知,不同粒径沙粒输沙量,在垂直方向上具有不同的分布特征,因下垫面不同,其垂向分布形态和输沙量大小也表现出差异性。对于细沙(125~250 μm),从沙障前裸沙地到沙障中部,输沙量逐渐减少,整体垂向分布规律不明显。对于极细沙(62.5~125 μm),在沙障前裸沙地,输沙量垂向分布呈指数递减规律;在沙障前部,输沙量垂向分布形态发生了改变,输沙量在上段(>20 cm)呈指数递减分布,而在 20 cm 之下则偏离指数分布;在沙障中部,输沙量垂向分布形态再次发生改变,输沙量随高度的变化缓慢增加。对于粗粉沙(31~62.5 μm),在沙障前裸沙地,输沙量垂向分布呈指数递减规律;在沙障前部,输沙量垂向分布形态发生了改变,输沙量在上段(>32 cm)服从指数递减的分布规律,下段偏离指数分布;在沙障中部,输沙量垂向分布形态再次发生改变,输沙量在下段(<10 cm)服从指数递减的分布规律,上段呈指数递增分布趋势。对于极细粉沙(3.9~7.8 μm)、细粉沙(7.8~15.6 μm)和中粉沙(15.6~31 μm),在沙障前裸沙地,输沙量在下段(<26 cm)呈指数递增分布,在上段呈指数递减分布;在沙障前部,中粉沙的输沙量在上段(>28 cm)服从指数递减的分布规律,下段偏离指数分布,细粉沙和极细沙的输沙量呈现先减小后增加的变化趋势;在沙障中部,输沙量在下段(<10 cm)呈指数递减分布,在上段呈

指数递增分布。对于粘土($<3.9 \mu\text{m}$),从沙障前裸沙地到沙障中部,输沙量逐渐增加。综上,与裸沙地相比,各粒径输沙量在沙障前部和中部的分布形态及含量差异明显。因此,尼龙网方格沙障的设置,改变了不同粒径沙粒输沙量的垂向分布特征,对于近地面约 $0\sim 32 \text{ cm}$ 高度范围内沙粒的输沙量大小及其分布的影响尤为显著。冯大军等^[13]在风洞试验中,选取了8个不同的粒径组,即 $710\sim 1\ 000 \mu\text{m}$, $500\sim 710 \mu\text{m}$, $500\sim 355 \mu\text{m}$, $355\sim 250 \mu\text{m}$, $250\sim 180 \mu\text{m}$, $180\sim 150 \mu\text{m}$, $150\sim 125 \mu\text{m}$, $125\sim 90 \mu\text{m}$,研究了不同试验风速条件下,不同粒径组沙粒输沙量垂向分布,结果表明,粗粒径组沙粒垂向输沙量上部符合指数递减分布,但近床面区偏离指数分布,呈现为偏大型分布,本试验不同粒径沙粒的垂向分布模式与冯大军等^[13]不同。因其结果反映的是粒径大于 $90 \mu\text{m}$ 的沙粒的输沙量的分布,而本文研究的是粒径小于 $250 \mu\text{m}$ 的沙粒输沙量的分布,由此可见,粒径不同,垂向分布模式也不同。

风是沙粒运动的主要动力。由于裸沙地(L1)位置的风力较强,粒径较小的颗粒(粘土、极细粉沙、细粉沙和中粉沙)往往被吹到较高的高度,而粒径较大的颗粒则在相对较低高度运动,故细粒径沙粒的输沙量随着高度的增加而增加,粗粒径沙粒则相反。当风沙流遭遇 20 cm 高的沙障时,该处风速减小,故细粒径沙粒的输沙量在 20 cm 以下随高度逐渐减小,粗粒径沙粒部分阻挡,故粗粒径沙粒的输沙量在 20 cm 以下随高度逐渐增加。另外,越深入沙障内部,风力也越弱(图3),风沙流挟沙能力降低,故粗粒径输沙量减小,细粒径增加。

2.3 风沙流输沙的方向性特征

由图5可知,裸沙地(T1)和沙障前部(T2)输沙量的空间分布较一致且集中,后者主要输沙方位的输沙量百分比大于前者,沙障中部(T3)的主要输沙方位发生了较大的变化。具体言之,裸沙地(T1)的输沙量主要以NNE、NE、ENE、NNW、W、WNW 6个方位为主,分别占输沙总量的 14.68% , 12.42% , 9.55% , 10.65% , 7.10% , 7.05% ,共计 61.45% 。沙障前部(T2)主要集中在NNE、NE、ENE、NNW、W 5个方位,分别占输沙总量的 14.85% , 15.13% , 11.35% , 10.21% , 10.06% ,共计占到 61.6% 。沙障中部(T3),SW、WSW、WNW、NNW、WN 5个方位所占比重较大,分别占输沙总量的 7.44% , 11.03% , 16.12% , 16.72% , 8.5% ,共计 59.81% 。综上,沙障的设置改变了风沙流的跃移方向。

赵景峰等^[19]在塔克拉玛干沙漠塔中一井地区,

利用风的气象资料和阶梯式积沙仪的数据,对风沙流的移动方向进行过研究,但并没有用跃移积沙仪对输沙量的空间分布进行过观测。杨兴华等^[20]通过全方位跃移积沙仪,观测了塔中地区平坦沙地上的5次沙尘天气过程的跃移输沙量的方位分布,结果显示,每次沙尘天气的输沙方向主要集中在N、NNE、NNW方向,输沙量占总输沙量的 56% 。本文沙障前裸沙地的研究结果与其既具有一致性又具有差异性,原因在于本文是在长期野外观测条件下,对输沙量的空间分布进行研究。在野外实际环境中,输沙量的空间分布受风速、风向以及下垫面等因素的综合影响。风沙流在裸沙地时,受NE、ENE、W和WNW风向和下垫面的影响(如图6),故裸沙地处的主要输沙方位为NNE、NE、ENE、NNW、W、WNW。风沙流从裸沙地进入沙障前部时,因风向未发生改变,故主要输沙方位也未变化。风速受到沙障的阻挡而减小(图3),使得沙粒在此沉积,故各主要方位输沙量增加。随着风沙流深入沙障,沙障的阻风和分流作用改变了风向、风速,使得沙障中部(T3)的主要输沙方位发生了较大变化。

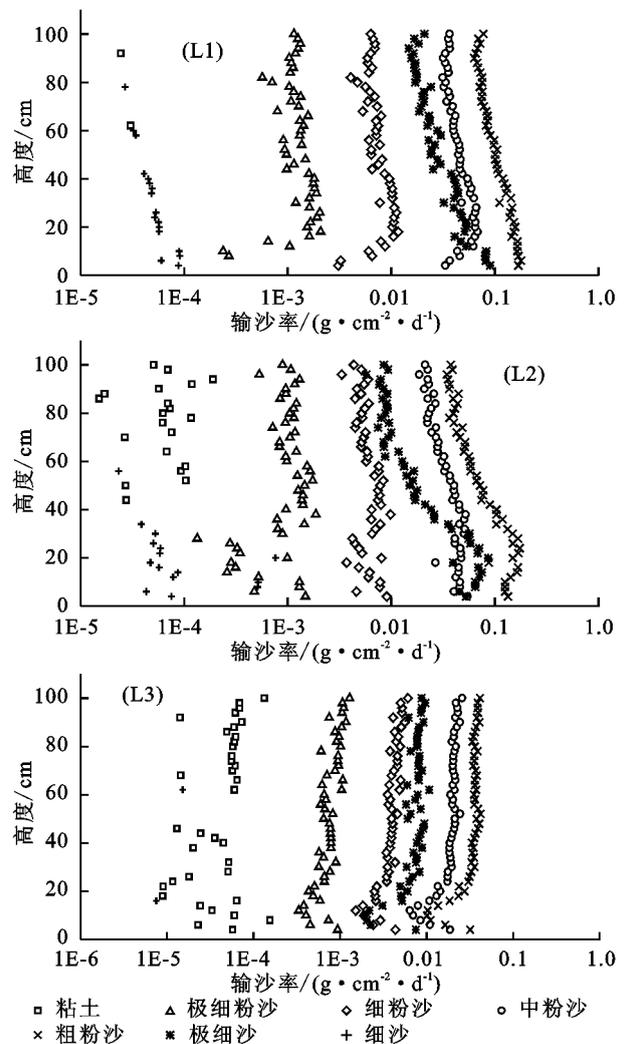


图4 各观测点不同粒径沙粒对应的输沙量垂向分布

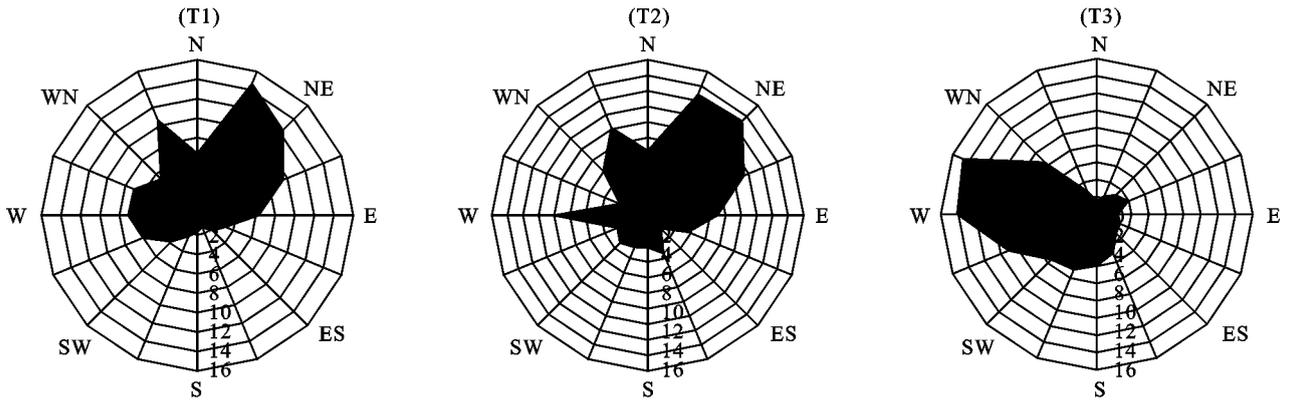


图5 各观测点风沙流输沙方位分布

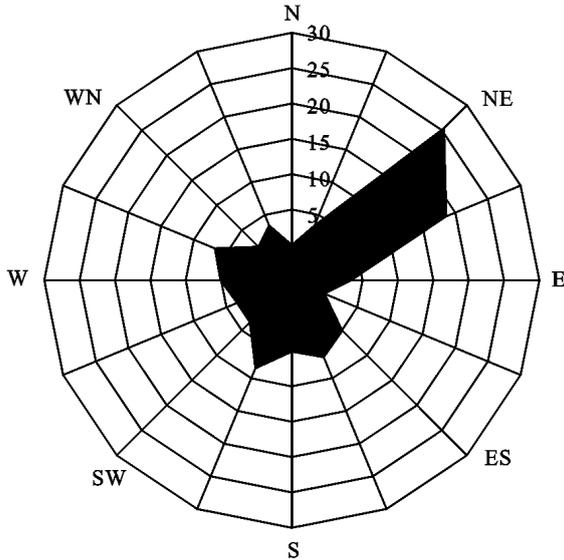


图6 裸沙地风向频率图

2.4 不同粒径风沙流颗粒的水平空间分布

由表1可知,不同粒径沙粒的输沙量,在水平方向上具有不同的分布特征,下垫面不同,其输沙量的水平分布也不同。

对于极细粉沙,在沙障前裸沙地,输沙方位主要集中在N、NEN、EN、W,占极细粉沙总输沙量的53.48%;在沙障前部,NEN、EN、EEN、W 4个方位所占比重较大,占极细粉沙总输沙量的69.51%;在沙障中部,输沙量的高值以WWS、WWN、WN、W 4个方位为主,占极细粉沙总输沙量的56.71%。

对于细粉沙,在沙障前裸沙地,N、NEN、EN、NWN、W 5个方位输沙量相对较高,占细粉沙总输沙量的54.50%;在沙障前部,细粉沙的输沙方位以NEN、EN、EEN、W、NWN为主,占细粉沙总输沙量的67.72%;在沙障中部,输沙量的高值以WWS、W、WWN、WN为主,占细粉沙总输沙量的56.39%。对于中粉沙和粗粉沙,在沙障前裸沙地,NEN、EN、EEN、NWN 4个方位输沙量相对较高,各占总输沙量的48.95%,48.02%;在沙障前部,输沙量主要集中在NEN、EN、EEN、W、NWN 5个方位,各自占总

输沙量的67.72%,63.88%;在沙障中部,WWS、W、WWN、WN 4个方位所占比重较大,各自占总输沙量的55.51%,52.33%。

对于极细沙,在沙障前裸沙地,NEN、EN、EEN、NWN的输沙量相对较高,占极细沙总输沙量的44.29%;在沙障前部,极细沙的输沙量以NEN、EN、EEN、W、NWN为主,占极细沙总输沙量的62.38%;在沙障中部,输沙量的高值主要集中在WWS、W、WWN、SWS、WS,占极细沙总输沙量的57.93%。对于细沙,在沙障前部,SES、S、W 3个方位的输沙量相对较高,占细沙总输沙量的57.22%;在沙障前部,主要输沙方位为WN、NWN,占细沙总输沙量的70.61%;在沙障中部,EES、ES、SWS所占比重较大,占细沙总输沙量的69.48%。

可见,不同粒径沙粒具有不同的水平分布特征。因此尼龙网方格沙障的设置,改变了不同粒径沙粒的水平分布,其中细沙的水平分布变化最显著。

沙粒的运动方式跟粒径有关。研究发现,粒径小于 $500\ \mu\text{m}$ 的沙粒最容易以悬移和跃移的方式运动^[21]。因此,本文研究的粒径在 $3.9\sim 250\ \mu\text{m}$ 之间沙粒的运动方式为悬移和跃移。

研究发现单个沙粒的运动除了受到曳力、重力和气流升力(Magnus力、Saffman力等)之外^[22],还会受到其他沙粒的碰撞和冲击所引起的瞬时向上冲击力。梅凡民等^[23]在风洞中用高速摄影技术,对作用于沙粒的几个主要力进行了粗略计算,认为沙粒起跳主要是碰撞冲击的结果,而碰撞冲击主要受到湍流的作用,其实质在于湍流与沙粒之间的动量传递^[24]。

尼龙网方格沙障的设置,影响了周围气流的流动特性,使沙障附近的气流流动速度(图3)和流动方向上都发生了改变,这种变化深刻影响着不同粒径沙粒的运动和沉积规律^[25-27],进而影响了不同粒径沙粒的水平分布。

表 1 不同粒径沙粒输沙量的水平分布

位置	方位	输沙量百分比/%					
		极细粉沙	细粉沙	中粉沙	粗粉沙	极细沙	细沙
T1	N	7.99	7.69	7.31	6.51	5.17	0.00
	NEN	10.21	12.15	14.69	15.26	13.59	6.89
	EN	24.17	17.88	14.57	11.94	11.10	5.82
	EEN	6.64	7.63	9.00	9.73	9.78	4.48
	E	7.68	6.99	6.31	6.06	6.86	4.44
	EES	2.29	3.22	2.96	3.09	3.42	2.21
	ES	0.92	1.68	2.06	2.34	2.08	1.04
	SES	2.37	1.68	1.34	1.23	1.63	7.34
	S	2.91	2.10	1.69	1.53	1.95	8.26
	SWS	3.64	2.73	2.37	2.21	2.52	1.64
	WS	1.73	3.04	3.81	4.19	3.05	0.00
	WWS	4.21	5.99	5.60	5.94	6.73	4.26
	W	11.10	8.01	6.67	6.42	8.90	41.62
	WWN	2.70	5.00	6.07	7.32	7.45	3.31
	WN	4.03	5.43	4.87	5.12	5.95	3.71
	NWN	7.41	8.77	10.69	11.08	9.82	5.00
T2	N	1.52	4.47	5.84	6.97	5.33	0.00
	NEN	17.86	17.12	15.67	14.48	14.92	15.72
	EN	30.04	19.31	17.23	14.46	14.83	16.02
	EEN	14.34	12.77	11.64	10.98	11.88	12.02
	E	1.67	4.81	6.04	7.34	6.87	4.91
	EES	4.57	4.26	3.82	3.51	3.68	3.83
	ES	0.25	0.29	0.37	0.40	0.37	0.27
	SES	6.78	4.25	3.69	3.13	3.40	3.51
	S	0.52	1.33	1.63	2.17	2.54	2.28
	SWS	0.00	1.44	2.18	2.73	2.00	0.00
	WS	3.45	3.32	2.98	2.88	3.33	3.20
	WWS	0.00	1.21	1.80	2.45	2.12	0.00
	W	7.26	8.21	10.06	10.47	9.28	7.10
	WWN	2.16	1.97	1.76	1.74	2.30	16.02
	WN	4.03	4.94	6.04	6.33	5.69	4.30
	NWN	5.53	10.32	9.27	9.95	11.46	10.82
T3	N	1.99	1.85	1.76	1.57	1.43	0.78
	NEN	4.12	3.49	2.93	2.25	1.53	0.00
	EN	3.13	3.36	3.72	3.26	2.06	0.00
	EEN	5.32	4.66	4.20	3.78	3.78	1.93
	E	3.55	2.99	2.64	2.38	2.49	1.22
	EES	3.85	3.24	2.87	2.71	3.37	12.18
	ES	4.86	3.52	2.94	2.85	4.11	17.92
	SES	2.72	3.75	3.95	4.89	6.21	3.63
	S	0.64	2.63	4.49	6.79	6.15	0.00
	SWS	6.71	6.44	5.99	6.44	9.37	39.39
	WS	2.26	4.13	5.83	7.97	8.42	3.67
	WWS	13.22	12.23	11.72	10.83	10.57	5.44
	W	10.10	14.50	16.69	17.02	13.54	0.00
	WWN	23.05	20.21	18.11	16.16	16.03	8.24
	WN	10.34	9.45	8.98	8.32	8.26	4.19
	NWN	4.12	3.56	3.18	2.78	2.67	1.42

3 结论

(1)裸沙地(L1)处的风沙流结构符合指数递减分布,相关系数 $R^2 = 0.94$;沙障前部(L2)在近床面区偏离指数分布,表现出明显的“象鼻”效应特征;沙障中部(L3)偏离指数分布,近似于倒置的“象鼻”。该地区沙障的设置,减弱了近地面(0~42 cm)输沙量。

(2)风沙流中不同粒径组沙粒对应的垂向输沙量具有不同的分布特征,在沙障前裸沙地,极细沙和粗粉沙输沙量垂向分布符合指数递减分布规律;极细粉沙、细粉沙和中粉沙的输沙量在下段呈指数递增分布,在上段呈指数递减分布。进入沙障后,其垂向分布形态和输沙量在近地面约0~32 cm高度范围内发生显著变化。

(3)从跃移的空间分布看,裸沙地(T1)和沙障前部(T2)输沙量的空间分布较一致且集中,主要输沙方位(NNE、NE、ENE、NNW、W)的输沙量占总输沙量的61%以上,经过沙障中部后,主要输沙方位发生了较大的变化。

(4)不同沙粒粒径的水平分布受沙粒的运动方式和沙障对流场的扰动有关。不同粒径沙粒的输沙量,在水平方向上具有不同的分布特征,经过沙障后,细沙的水平分布变化最显著。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社, 2003:61-69.
- [2] 杨东亮,王雪芹,胡永锋,等. 风沙流输沙通量垂向分布研究:以塔克拉玛干沙漠南缘流沙地表风沙流观测为例[J]. 中国沙漠, 2012, 32(3):631-639.
- [3] 杜鹤强,韩致文,王涛. 新月形沙丘表面风速廓线与风沙流结构变异研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1):9-16.
- [4] Ni J R, Li Z S, Mendoza C. Vertical profiles of Aeolian sand mass flux[J]. *Geomorphology*, 2002, 49(3):205-218.
- [5] 钟卫,孔纪名,杨涛. 植被沙障对近地表风沙流特征影响的风洞实验[J]. 干旱区研究, 2009, 26(6):872-876.
- [6] 张正德,董治宝. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠, 2013, 33(4):973-980.
- [7] 王自龙,赵明,冯向东,等. 民勤绿洲外围不同下垫面条件下风沙流结构的观测研究[J]. 水土保持学报, 2009, 23(4):73-75.
- [8] 哈斯. 腾格里沙漠东南缘沙丘表面风沙流结构变异的初步研究[J]. 科学通报, 2009, 49(11):1099-1104.
- [9] Dong Z B, Qian G Q, Luo W Y, et al. Analysis of the mass flux profiles of an aeolian saltating cloud [J]. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, 111(16):139-161.
- [10] 屈建军,黄宁,拓万全,等. 戈壁风沙流结构特性及其意义[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1):19-23.
- [11] Zhang K C, Qu J J, Zu R P, et al. Characteristics of wind-blown sand on Gobi/mobile sand surface[J]. *Environment Geology*, 2008, 54(2):411-416.
- [12] 张伟民,汪万福,张克存,等. 不同沙源供给条件下砾石床面的风沙流结构与蚀积量变化风洞实验研究[J]. 中国沙漠, 2009, 29(6):1015-1020.
- [13] 冯大军,倪晋仁,李振山. 风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量垂向分布实验研究[J]. 地理学报, 2007, 62(11):1194-1203.
- [14] 董玉祥, Namikas S L, Hesp P A. 海岸风沙流中不同粒径组沙粒的垂向分布模式[J]. 地理研究, 2009, 28(5):1179-1187.
- [15] 董玉祥,马骏. 风速对海岸风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J]. 中山大学学报, 2008, 47(5):98-103.
- [16] 董玉祥,马骏. 输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的影响[J]. 中山大学学报, 2009, 48(3):102-108.
- [17] 董玉祥,黄德全,马骏. 海岸沙丘表面不同部位风沙流中不同粒径沙粒垂向分布的变化[J]. 地理科学, 2010, 30(3):391-397.
- [18] 何清,杨兴华,艾力·买买提明,等. 塔克拉玛干沙漠风蚀起沙观测研究:试验介绍与观测结果初报[J]. 2011, 31(2):315-322.
- [19] 赵景峰,李崇舜,何清,等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中—井地区起沙风分析和输沙量估算[J]. 干旱区地理, 1995, 18(3):39-47.
- [20] 杨兴华,何清,艾力·买买提明,等. 塔克拉玛干沙漠腹地塔中地区风沙流输沙特征研究[J]. 干旱区地理, 2011, 34(3):479-485.
- [21] 程旭. 风沙两相流中沙粒起动规律的实验研究[D]. 北京:清华大学, 2003.
- [22] 武建军,闫光虎. 风沙电多场耦合中沙粒跃移运动的受力分析[J]. 中国科学, 2008, 38(8):973-983.
- [23] 梅凡民,蒋缠文. 风沙颗粒运动的数字高速摄影图像的分割算法[J]. 力学学报, 2012, 44(1):82-87.
- [24] 王磊. 风沙两相流水平沙面沙粒起动形式及机制的实验研究[D]. 西安:西安工程大学, 2011.
- [25] 罗万银,董治宝,钱广强,等. 栅栏对颗粒起动风速影响的实验研究[J]. 中国沙漠, 2007, 27(2):201-205.
- [26] 金昌宁,董治宝,李吉均,等. 高立式沙障处的风沙沉积及其表征的风沙运动规律[J]. 中国沙漠, 2005, 25(5):652-657.
- [27] Alhajraf S. Computational fluid dynamic modeling of drifting particles at porous fences [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2004, 19(2):163-170.