

黄雨晖, 韩小元, 赵健, 等, 2019. 新疆戈壁地区风沙流结构及其粒径特征研究[J]. 气象与减灾研究, 42(3):199-205.
Huang Yuhui, Han Xiaoyuan, Zhao Jian, et al, 2019. Study on wind-blown sand flow structure and particle size characteristics in gobi area of Xinjiang[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 42(3):199-205.

新疆戈壁地区风沙流结构及其粒径特征研究

黄雨晖, 韩小元, 赵健, 富宝锋, 司高华, 李哲

西北核技术研究所, 陕西 西安 710024

摘要: 为掌握研究区域风沙流活动情况, 设计并完成了长跨时(2016年5月—2018年5月)的戈壁风沙流现场累积观测。基于观测数据和砂土样品, 对研究区域的风沙流活动特征及其结构进行系统分析, 在此基础上建立输沙通量廓线函数模型。结果表明: 1) 观测期间现场输沙率水平在 177—330 g/(cm·a), 均值约 247 g/(cm·a)。2) 风沙流和地表砂土粒径分布分别呈双峰和单峰型, 且风沙流中砂土占比与地表砂土占比的比值随粒径增大而减小。3) 建立的线性-多项式-幂函数和指数-幂函数两种模型都能较准确地描述风沙流的输沙通量廓线, 拟合优度均值超过 0.98, 适用于反映现场风沙流结构。

关键词: 风沙流, 戈壁, 粒径分布, 通量廓线, 函数模型

中图分类号: X169

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2019)03-0199-07

doi: 10.12013/qxyjzjy2019-032

Study on Wind-blown Sand Flow Structure and Particle Size Characteristics in Gobi Area of Xinjiang

Huang Yuhui, Han Xiaoyuan, Zhao Jian, Fu Baofeng, Si Gaohua, Li Zhe

Northwest Institute of Nuclear Technique, Xi'an 710024, China

Abstract: In order to study the wind-blown sand flow activities in the research area, a long-span (2016.05 – 2018.05) wind-sand flow observation was designed and completed. Based on the observation data and sand sample, the characteristics and structure of the activities were analyzed, and then the profile function model of sediment transport flux was established. The results showed that, 1) During the observation period, the on-site sediment transport rate level was 177 – 330 g/(cm·a), with the average value of about 247 g/(cm·a). 2) The particle size distribution of aeolian sand flow and surface sand presented bimodal and unimodal types, respectively, and the ratio of the proportion of the sand in the wind-blown to that on the ground decreased with the particle size increased. 3) The established linear-polynomial-power function and exponential-power function can accurately describe the sediment transport flux profiles of wind sand flow, and the average correlation coefficient between the observations and the fitted results exceeded 0.98, which was suitable for reflecting the wind sand flow structure on site.

Key words: wind-blown sand; gobi; distribution of particle size; sand flux profile; function model

0 引言

戈壁地区气候干旱、植被稀疏、地表砂砾覆盖, 经常出现的大风携带地表砂土迁移, 形成风沙流, 对附近环境、动植物和人类生存造成危害, 尤其对基础设施具有强大的破坏力。随着“一带一路”战略的实

施, 其辐射区域的经济、文化、基础设施建设正加快发展, 人口和资源流通增加, 因此沿线地区的土地戈壁化、荒漠化扩散及风沙流灾害问题亟待解决。风沙流活动规律研究是相关灾害防治的重要前提和基础, 因此其具有重要的意义。哈斯(2004)和任小玢(2013)皆对腾格里沙漠东南缘风沙流活动进行了研

收稿日期: 2019-07-14; 修订日期: 2019-08-28.

作者简介: 黄雨晖, 硕士, 助理工程师, 主要从事风沙灾害及防治研究, E-mail: huangyuhui723@qq.com.

究,掌握了沙丘不同部位的输沙率和输沙通量廓线,并对廓线进行了拟合;董玉祥等(2008)对海岸横向沙脊表面风沙流结构进行了观测研究,对风沙流输沙通量廓线的不同函数模型进行了讨论,得到了当地风沙流结构的最佳拟合曲线;Fujisawa等(2010)在风洞实验中通过高速摄像机观测研究了砂土运动与风场的关系,用函数描述了不同高度砂土运动速度与风速的关系,并得到了砂土掉落反弹过程的运动特性;Farrell等(2012)对巴西 Jericoacoara 地区的风沙流活动进行了观测,发现指数模型能较好描述现场输沙通量廓线,并得到了砂土粒径随高程的变化规律;王翠等(2017)对新疆策勒地区绿洲—沙漠过渡带进行了风速和风沙流观测,得到了空地动力学粗糙度与地表植被的关系,并得到了不同地表的输沙通量廓线模型;Xu等(2018)对风沙流经过草方格时的结构活动特征进行了模拟分析,得到了湍流及沙粒运动情况,并分析了其机理;He等(2018)数值模拟了沙丘后回流区风沙流的结构及运动特征,并分析了其对桥梁结构的影响,提出了防治建议;杨欢等(2018)对不同风速下不同沙丘处的风沙流结构进行了观测和分析,得到了风速与输沙量的函数关系,并掌握了现场风蚀情况及粒径分布;谭立海等(2018)对兰新高铁烟墩风区近地表的风沙流跃移运动进行了观测和分析,得到了不同高度的风沙跃移特性;刘旭阳等(2019)对新月形沙丘脊线处的风沙流结构进行了观测和分析,分别给出了正、反风向下的风沙流结构及函数描述。

以上研究大多针对沙漠地表,而戈壁地区风沙流研究起步较晚,缺乏长时间的累积观测及系统分析,风沙流与地表砂土的关系也还缺乏研究。同时,由于各地地表组成及风场情况不同,因此风沙流研究具有一定的地域性。文中,为了掌握当地风沙流活动概况,设计并完成了长跨时的戈壁风沙流现场累积观测。基于观测数据和砂土样品,对研究区域的风沙流活动情况及其结构进行系统研究,力图掌握现场输沙水平,得到风沙流与地表砂土粒径间的关系,并在此基础上,建立适用于研究区域的输沙通量廓线函数模型。通过上述研究,掌握当地风沙流活动概况,以期能为风沙流灾害防治提供技术支持。

1 研究区域概况

研究区域位于新疆南部,属平原地形,地势较平坦;当地为戈壁地表,表层主要为砂砾土,整体砾石覆盖度约 60%,植被贫乏,以抗干旱、耐盐碱类植物

为主(王志强,2010)。气候属大陆性干旱气候,风沙流观测同期采集的气象数据表明,当地降水少、蒸发量大,年平均降水 25 mm,年蒸发量 2 000 mm,年平均相对湿度 31%;温差较大,年最高气温 43.9℃,最低气温 -19.3℃,年温差达到 63.2℃,年平均气温 13.0℃;风向单一,年主导风为东北风,年平均风速为 5.2 m/s,最大风速为 22.8 m/s。

2 观测试验设计

研究区域的风向较为单一,因此沿主导风向设置集沙仪(图 1)共 7 台,测点 1—7 依次排列,相互间隔 1 km,集沙口朝向主导风来流方向。集沙仪高 1 m,沿高程设置 2 cm×2 cm 截面集沙口共 50 层,分别收集不同高度的输沙量,以观测风沙流结构特征,观测时间为 2016 年 5 月—2018 年 5 月。

3 风沙流活动情况及粒径分析

3.1 各测点风沙流活动情况

将 7 个测点集沙仪收集的砂土筛选并称重,计算后得到各测点的输沙率(图 2)。可以发现,观测



图 1 集沙仪实物图

Fig.1 The sand collector

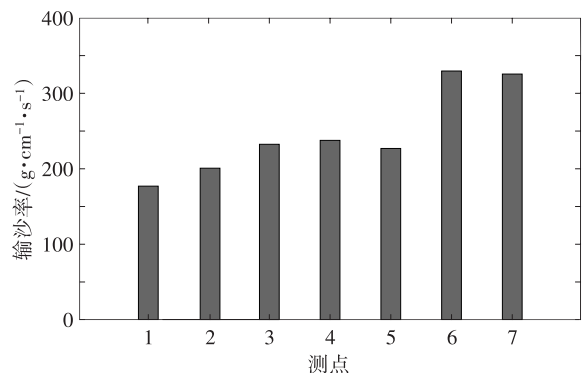


图 2 各测点输沙率

Fig.2 The sand transport rates of each observation point

期间现场输沙率为 177—330 g/(cm·a),平均约为 247 g/(cm·a),6、7 测点的输沙率略高于其他测点,这可能是由当地砾石覆盖度不同、局部起风等情况导致的。

3.2 风沙流粒径分析

分别将集沙仪采集的砂土样品和地表砂土样品分粒径筛选并称重,得到其粒径分布(图 3)。分析发现,风沙流中粒径<0.075 mm 和 0.1—0.25 mm 的砂土质量占比最高,呈现双峰型分布,而粒径≥0.25 mm 的砂土占比基本呈递减趋势。其中,6、7

测点采集的粒径 0.1—0.25 mm 的砂土占比较突出,占到了其集沙总量的 1/3 以上,而其他测点最大占比的砂土集中在<0.075 mm 的小粒径范围。同区域前期观测结果则表明,风速较低(<7 m/s)时风沙流运输以粒径<0.1 mm 的粉沙和细沙为主;风速较高(≥18 m/s)时则以粒径 0.1—0.25 mm 的砂土为主(王志强等,2010)。结合第 3.1 节的分析,6、7 测点输沙率较大的可能原因之一是附近整体风速较大,这同时导致了该两个测点粒径为 0.1—0.25 mm 的砂土占比较高。

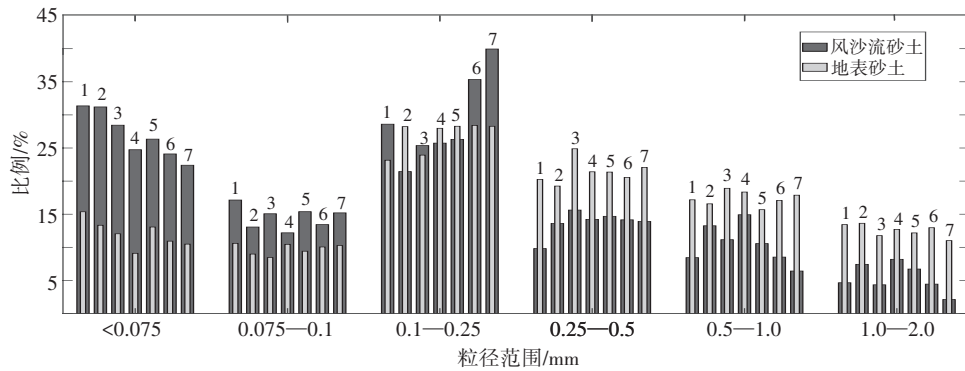


图 3 各测点砂土粒径分布(线柱上端数码为测点编号)

Fig.3 The particle size distributions of sand in each observation point

地表砂土的分布则更接近单峰型,粒径 0.1—0.25 mm 的砂土质量占比最高,粒径<0.075 mm 的砂土比粒径为 0.075—0.1 mm 的砂土质量占比略大,粒径≥0.25 mm 的砂土质量占比同样呈递减的趋势。

为定量分析风沙流与地表砂土粒径分布的关系,计算风沙流中某粒径砂土占比和地表该粒径砂土占比的比值 r :

$$r(d) = p_w(d) / p_g(d) \quad (1)$$

其中, d 为砂土粒径; $p_w(d)$ 为风沙流砂土中粒径为 d 的样品质量占比; $p_g(d)$ 为地表砂土中粒径为 d 的样品质量占比。

分析图 4 发现, r 值随着粒径增大整体呈递减趋势,粒径<0.1 mm 砂土的 r 值都在 1 以上,粒径≥0.25 mm 砂土的 r 值都在 1 以下,粒径 0.1—0.25 mm 砂土的 r 值则在 1 附近波动。可见,相较于地表砂土,风沙流中砂土占比更向小粒径偏移;风沙流中粒径<0.075mm 的砂土占比大幅增加,粒

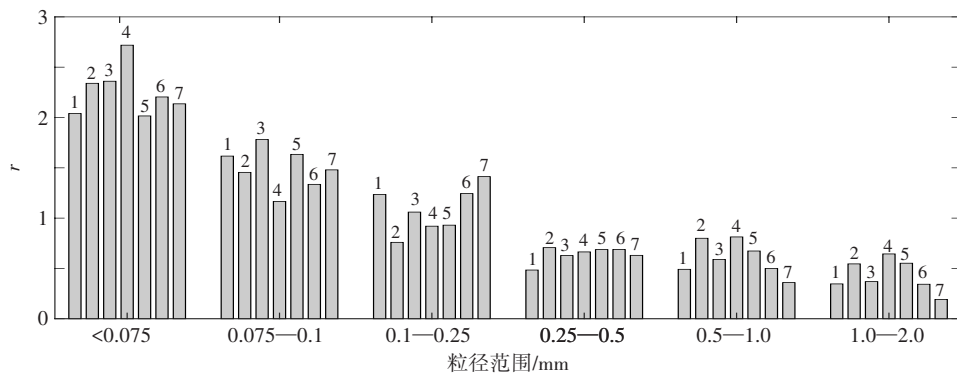


图 4 各测点各粒径砂土的 r 值(线柱上端数码为测点编号)

Fig.4 The r values of each particle size at each observation point

径 0.075—0.1 mm 的砂土占比也明显增多,粒径 ≥ 0.25 mm 的砂土占比则明显减少;地表砂土则相反。也就是说,与地表砂土相比,风沙流中砂土粒径分布以粒径 0.1—0.25 mm 为分界,大粒径砂土偏少,小粒径砂土偏多。

4 风沙流结构分析

将收集到的砂土分层筛选称重,可以得到输沙通量的高程分布(图 5)。戈壁风沙流经常存在“象鼻”效应,即戈壁地表相比沙地较紧较硬,风沙流中砂土与地表碰撞后起跳更高,一定量的砂土会分布在较高处,因此输沙通量廓线可能会在近地处呈现

如图中 2、6 测点存在的“象鼻”。

对风沙流的输沙通量廓线,相关研究(哈斯,2004;董玉祥,2008)提出了一些函数模型进行描述,针对不存在“象鼻”效应的风沙流,主要有指数函数和幂函数两种;有学者认为砂土跃移运动为主的风沙流的廓线符合指数规律,砂土悬移运动为主的风沙流的廓线符合幂函数规律;也有学者提出了多项式函数的拟合方法,取得了较好的拟合结果。而对存在“象鼻”效应的风沙流结构,不同研究者也存在不同观点:张克存等(2005)利用分式多项式形式对其拟合;尹永顺(1989)利用分段函数对其进行拟合,由线性增加层、饱和层和指数衰减层组成。

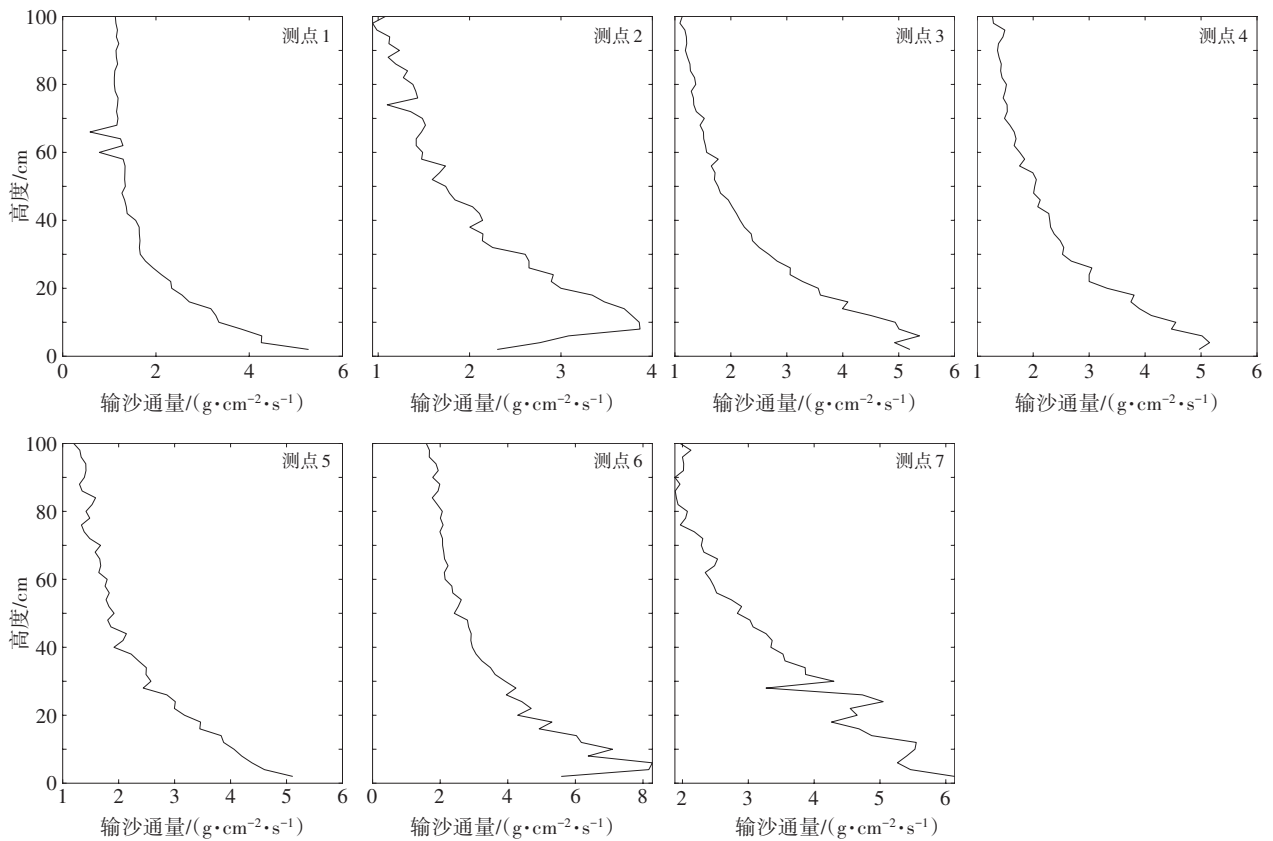


图 5 各测点输沙通量的廓线

Fig.5 The sand flux profile of each point

结合上述研究结果,对研究区域各测点输沙通量廓线进行分析,基于最小二乘法进行拟合,并用拟合优度 R^2 评价拟合情况,以提出能够更准确描述研究区域风沙流输沙通量廓线的函数模型。

对不存在明显的“象鼻”效应的输沙通量廓线分布,可以用幂函数、指数函数和多项式模型分别进行描述。

$$q = az^b \quad (2)$$

$$q = a \exp(-z/b) \quad (3)$$

$$q = a + bz + cz^2 \quad (4)$$

其中, q 为输沙通量; z 为高度; $a-c$ 为待定系数。

对比分析发现,幂函数形式更能准确描述研究区域较高高度的输沙情况,提出指数-幂函数的分段函数模型:

$$q = \begin{cases} a \exp(-z/b) & (z \leq h) \\ cz^d & (z > h) \end{cases} \quad (5)$$

其中, q 为输沙通量; z 为高度; $a-d$ 为待定系数; h 为分段高度。

分别利用式(2)–(5)对不存在明显“象鼻”效应

测点的输沙通廓线进行拟合分析,得到测点 1、3、4、5、7 的拟合结果(图 6)及其拟合优度(表 1)。

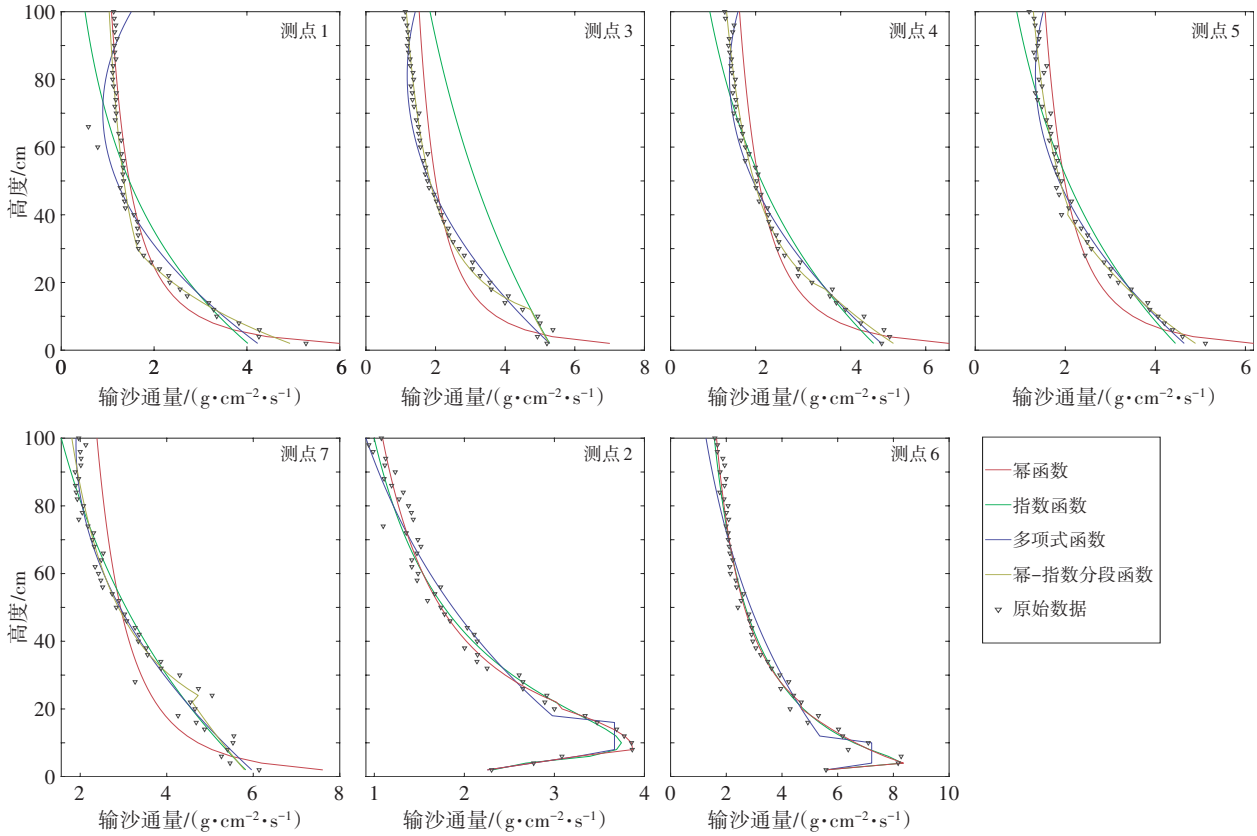


图 6 各测点的输沙通廓线拟合结果

Fig.6 The fitting results of sand flux profile for point 1, 3, 4, 5, 7, and 2, 6

表 1 测点 1、3、4、5、7 输沙通廓线拟合结果优度

Table 1 The correlation coefficients between observation and fitted result for sand flux profile of point 1, 3, 4, 5, and 7

测点	拟合优度 R^2			
	幂函数	指数函数	多项式函数	指数-幂函数
1	0.930 2	0.828 6	0.922 6	0.977 9
3	0.822 7	0.957 9	0.978 6	0.992 7
4	0.866 8	0.943 4	0.976 1	0.992 4
5	0.894 8	0.939 7	0.975 4	0.991 6
7	0.789 3	0.954 1	0.966 2	0.968 4

分析拟合结果发现,单一的指数和幂函数形式都存在一定局限性,无法统一描述不存在明显“象鼻”效应的 5 个测点的风沙流结构特征,多项式模型吻合稍好,而指数-幂函数模型在 5 组拟合中拟合优度皆为最高,能够比前人提出的其他模型更好地描述研究区域风沙流结构特征。

分析还发现,幂函数模型更能准确描述研究区

域较高高度的输沙情况。因此,为更准确描述输沙通廓线在饱和层附近的变化行为,采用新的分段函数(式(6))来描述研究区域存在“象鼻”效应的输沙通廓线,该模型由线性增加层、多项式饱和层及幂函数衰减层组成,并将其与前人提出的的分式多项式(式(7))和分段函数(式(8))进行对比分析,得到拟合结果(图 7)及其拟合优度(表 2)。

$$q = \begin{cases} a + bz (z < h_1) \\ c + dz + ez^{1/2} (h_1 \leq z < h_2) \\ fz^g (z \geq h_2) \end{cases} \quad (6)$$

$$q = \frac{a + cz + ez^2 + gz^3 + iz^4}{1 + bz + dz^2 + fz^3 + hz^4 + jz^5} \quad (7)$$

$$q = \begin{cases} a + bz (z < h_1) \\ c (h_1 \leq z < h_2) \\ d \exp(-z/e) (z \geq h_2) \end{cases} \quad (8)$$

其中, q 为输沙通量; z 为高度; $a-j$ 为待定系数; h_1 为饱和层下限; h_2 为饱和层上限。

表2 测点2、6输沙通量廓线拟合优度

Table 2 The correlation coefficients between observation and fitted result for sand flux profile of point 2 and 6

测点	拟合优度 R^2		
	分式多项式	分段函数(指数)	分段函数(幂)
2	0.981 4	0.971 3	0.988 0
6	0.983 6	0.949 3	0.985 1

分析拟合结果发现,高层为指数衰减的分段函数模型(式(8))拟合偏差最大,分式多项式模型(式(7))拟合优度较高,但其参数较多、形式复杂,而文中提出的式(6)拟合优度最高,且与式(5)形式更统一。因此,可以认为式(5)、式(6)模型适用于共同描述现场风沙流结构。两个模型对研究区域7个测点输沙通量廓线拟合得到的优度均值超过了0.98。

综上所述,两种廓线高层结构相似,皆更符合幂函数分布。结合相关分析成果,认为此部分沙粒可能更接近悬移运动,随高度变化较缓。而较低层分为存在“象鼻”效应与否的两种情况,不存在“象鼻”效应时其廓线更符合指数分布,即可能更接近跃移运动,随高度变化较快;存在“象鼻”效应时,由于沙粒碰撞地表起跳,则出现了饱和层部分的凸起及地表附近的递增层。

同时,函数模型中拟合参数 h_1 、 h_2 和 h 表明了廓线分层位置,式(5)中 a 、 c 决定了整体输沙水平,参数 b 、 d 决定了其廓线型,如 d 的绝对值越大,表明幂函数拐点处斜率变化越快,高层与低层的输沙率差距越大,指数函数的 b 则相反。综上所述,精确的输沙通量廓线函数模型有利于更清晰地认识风沙流输沙通量廓线的性质及模型的物理意义,并由模型函数形式和拟合参数定量描述输沙通量廓线的性质,为阻沙措施的设计提供参考。

5 结论与展望

为对研究区域风沙防治提供数据支撑,在戈壁地表设立集沙仪进行长时间尺度的风沙流结构观测,对现场风沙流情况进行分析讨论,主要得到以下结论:

1) 掌握了现场风沙流概况,发现各测点风沙流输沙率最小约为 $177 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{a})$,最大约为 $330 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{a})$,均值为 $247 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{a})$ 。其中,6、7测点输沙量较大,可能由当地砾石覆盖度及局部起风等导致。

2) 风沙流和地表砂土的质量比值随粒径增大而减小,其中风沙流中砂土粒径集中在 $<0.075 \text{ mm}$

和 $0.1-0.25 \text{ mm}$ 区间,而地表砂土则以 $0.1-0.25 \text{ mm}$ 粒径为主。

3) 建立的线性-多项式-幂函数和指数-幂函数两种模型都能较准确地描述风沙流的输沙通量廓线,拟合优度均值超过0.98,适用于反映现场风沙流结构。

文中,基本掌握了现场风沙流强度区域分布及结构特征,并对风沙流、地表沙粒两者的粒径关系及风沙流结构进行了定量描述,基于研究结果可以有针对性地设计阻沙防沙措施。后续工作还需进一步对研究区域的风速与风沙流活动关系进行探索,建立计算模型,从而通过地表和风场对风沙流活动进行分析和预测,为风沙灾害防治提供指导。

参考文献(References)

- 董玉祥, Hesp P A, Namikas S L, 等. 2008. 海岸横向沙脊表面风沙流结构的野外观测研究[J]. 地理科学, 28(4):507-512. Dong Y X, Hesp P A, Namikas S L, 2008. Field measurements of structure of wind-sand flow on coastal transverse ridge in China [J]. Scientia Geographica Sinica, 28(4):507-512. (in Chinese)
- Farrell E J, Sherman D J, Ellis J T, et al, 2012. Vertical distribution of grain size for wind blown sand[J]. Aeolian Res, 7:51-61.
- 哈斯, 2004. 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, 49(11):1099-1104. Ha S, 2004. Preliminary study on the variation of wind-sand flow structure on the surface of sand dunes on the southeastern margin of the Tengger Desert [J]. Chin Sci Bull, 49(11):1099-1104. (in Chinese)
- He W, Huang N, Xu B, et al, 2018. Numerical simulation of wind-sand movement in the reversed flow region of a sand dune with a bridge built downstream[J]. Eur Phys J E, 41(8):53. DOI: 10.1140/epje/i2018-11660-5.
- Fujisawa H, Kubota S, 2010. Analysis on the motion of wind-blown sand grains using a high-speed digital camera[J]. J Res Inst Sci, 122:11-18.
- 刘旭阳, 宁文晓, 王振亭, 2019. 新月形沙丘脊线处的风沙流结构[J]. 中国沙漠, 39(6):1-7. Liu X Y, Ning W X, Wang Z T, 2019. Aeolian sand structure at the brink of barchans[J]. J Desert Res, 39(6):1-7.
- 任小玢, 2013. 腾格里沙漠东南缘风沙流特征[D]. 西安:陕西师范大学. Ren X F, 2013. Characteristics of wind-sand flow in the southeastern margin of the Tengger Desert[D]. Xi'an: Shanxi Normal University. (in Chinese)
- 谭立海, 张伟民, 边凯, 等. 2018. 兰新高铁烟墩风区戈壁近地表风沙流跃移质垂直分布特性[J]. 中国沙漠, 38(5):919-927. Tan L H, Zhang W M, Bian K, et al, 2018. Features of wind-blown sand over near-surface of gobi: A case study in Yandun wind district, Xinjiang of China[J]. J Desert Res, 38(5):919-927. (in Chinese)
- 王翠, 李生宇, 雷加强, 等. 2017. 不同下垫面沙通量估算——以策勒

- 绿洲—沙漠过渡带为例[J]. 干旱区地理, 40(3):533-540.
- Wang C, Li S Y, Lei J Q, et al, 2017. Sand flux estimation of different underlying surface: A case of Cele oasis-desert ecotone [J]. *Arid Land Geogr.* 40(3):533-540. (in Chinese)
- 王志强, 黄晟敏, 于涛, 等, 2010. 戈壁地表风沙运动特征的野外观测研究[J]. 新疆环境保护, 32(3):10-13. Wang Z Q, Huang S M, Yu T, et al, 2010. Research on the characteristics of Blowing sand drift over gobi surface by field experiment [J]. *Environ Prot Xinjiang*, 32(3):10-13. (in Chinese)
- Xu B, Zhang J, Huang N, et al, 2018. Characteristics of turbulent aeolian sand movement over straw checkerboard barriers and formation mechanisms of their internal erosion form [J]. *J Geophys Res: Atmos.* 123(13):6907-6919.
- 杨欢, 李玉强, 王旭洋, 等, 2018. 半干旱区不同类型沙丘风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 38(6):1144-1152. Yang H, Li Y Q, Wang X Y, et al, 2018. Characteristics of aeolian sediment flux structure over different underlying surfaces in semi-arid area [J]. *J Desert Res*, 38(6):1144-1152. (in Chinese)
- 尹永顺, 1989. 砾漠大风地区风沙流研究[J]. 中国沙漠, 9(4):27-36. Yin Y S, 1989. Study on sand drift in strong wind region in gravel desert [J]. *J Desert Res*, 9(4):27-36. (in Chinese)
- 张克存, 屈建军, 俎瑞平, 等, 2005. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J]. 水土保持研究, 12(1):54-55. Zhang K C, Qu J J, Zu R P, et al, 2005. Research on the characteristics of structure of drifting sand flux and wind velocity profile over gobi [J]. *Res Soil Water Conserv.* 12(1):54-55. (in Chinese)