

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*

董玉祥, 马 骏

(中山大学地理科学与规划学院, 广东 广州 510275)

摘 要: 在我国海岸沙丘的典型分布区河北昌黎黄金海岸, 对不同输沙量下海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒垂向分布的变化进行了野外观测。结果表明, 在风速相近、物质组成一致和下垫面性质相同情况下, 随着风沙流总输沙量的增加, 在非均匀沙床面上不同粒径组沙粒的垂向分布呈现出了不同的变化特点。其中, 随总输沙量增加粗沙输沙量总量并无增加, 其输沙量下层减少、中层增加、上层减少, 垂向分布转变为典型负幂函数模式; 中沙在不同高度的绝对输沙量均有增加, 相对输沙量下层(0~4 cm)减少、上层(4~60 cm)增加或基本持平, 其垂向分布基本符合指数递减规律, 尤其是在0~60 cm高度内的分布随总输沙量的增加由负幂函数转变为指数函数; 细沙输沙量总量和不同高度的输沙量均有不同程度的增加, 相对输沙量下层(0~6 cm)减少、上层(6~60 cm)基本持平或增加, 垂向分布符合典型的指数函数布模式。究其原因, 主要应与不同风速气流的携沙极限以及不同粒径组沙粒的运动方式密切相关。

关键词: 输沙量; 海岸沙丘; 粒径; 垂向分布; 风沙流

中图分类号: X169 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579(2009)03-0102-07

Influence of Total Sand Transport Rates on the Vertical Distribution of Different Sand Grain Sizes in Wind-sand Flow on the Coastal Dune

DONG Yuxiang, MA Jun

(School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The data of vertical distribution of different sand grain sizes at different total sand transport rates, including the data of structure of wind-sand flow and its grain size composition of sands at different heights, were measured on the crest of typical coastal transverse ridge along the Changli Gold Coast in Hebei Province, which is one of the most typical coastal Aeolian distribution regions in China and famous for the tall and typical coastal transverse ridges. The results showed that under the conditions of near wind velocity and the same surface material and environment, with increasing total sand transport rates in the wind-sand flow, vertical distribution of different sand grain sizes in the wind-sand flow on the crest of coastal transverse ridge had different change features. With increasing total sand transport rates, the transport rate of coarse sands had no increase, the ratio of sand transport rates of different height layers in total sand transport rates decreased at the low height layer (0~2 cm) and high height layer (32~60 cm), and increased at the middle height layer (2~32 cm). The vertical distribution of coarse sand transport rate in the wind-sand flow could be expressed by the typical power function. The transport rates of middle sand at all height layers increased, the ratio of sand transport rates of different height layer in total sand transport rates decreased at the low height layer (0~4 cm) and increased at the high height layer (4~60 cm). The vertical distribution of middle sand transport rate in the wind-sand flow could be

* 收稿日期: 2008-07-22

基金项目: 国家自然科学基金项目资助项目(40571019, 10532030)

作者简介: 董玉祥(1964年生), 男, 博士, 教授; E-mail: eesdyx@mail.sysu.edu.cn

expressed by exponential function. With increasing total sand transport rates, the transport rate of fine sands increased at different height layers, its ratio in total sand transport rates decreased at the 0 ~ 6 cm height layer and increased at the 6 ~ 60 cm height layer. The vertical distribution of fine sand transport rate could be expressed by the typical exponential function. These changes had a close relationship with the limit of sand grain size of wind flow transporting with definite wind velocity and transporting ways of sands with different grain sizes in the wind-sand flow.

Key words: sand transport rate; coastal dune; grain size; vertical distribution; wind-sand flow

1 研究背景

国内外已进行了大量风沙流结构的野外观测、风洞模拟实验和数值模拟研究^[1-13],包括关于风速^[2,14-18]、输沙量^[2,14,16]、沙粒粒径^[2,19-21]和下垫面性质及形态^[2,16,22-23]等因素对风沙流结构影响的研究等。其中关于输沙量对风沙流结构的影响,一般认为随着气流中总搬运量的增大,会引起各层绝对输沙量增加,同时相对输沙量在下层增加、上层减少^[2];对于粒径的影响,董治宝等通过风洞实验证明在均匀沙床面上不同粒径的输沙量垂向分布特征均类似即都符合典型的指数递减规律^[19],邵亚平等^[20]在非均匀风沙跃移运动的数值模拟研究中也认为不同粒径沙粒具有类似的输沙量分布特征,而冯大军^[21]等通过非均匀沙床面上的风洞实验则提出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并呈现为偏大型分布、细粒径组沙粒垂向输沙量在整个高度上均符合指数递减规律。但是,关于输沙量对非均匀沙床面上风沙流中不同粒径组沙粒输沙量垂向分布影响的研究还鲜见报道,且缺少相关野外实地观测资料与数据的验证,同时对海岸沙丘的类似研究近乎缺失。

为此,选择国内规模最大、形态最为典型的河北昌黎黄金海岸的横向沙脊,进行不同输沙量下海岸沙丘表面风沙流结构及其不同高度气流搬运的沙物质粒度构成的野外实地观测,探讨输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒垂向分布的可能影响及其机理。

2 观测技术与方法

2.1 野外观测区概况

输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒垂向分布影响的野外观测地点选择在河北昌黎黄金海岸,该区域是我国海岸沙丘最为典型的分布区之一^[24-29],沿其海岸线南北长约45 km、宽约1.5 ~ 2 km的范围内,有锥形前丘、横向沙脊、新月

形沙丘及沙丘链、海岸沙席等海岸沙丘类型,其中尤以横向沙脊最为高大和典型。区内的横向沙脊NNE-SSW走向,长度5 ~ 9 km,高度一般大于20 m,最高可达40 m,单个沙丘宽度约150 ~ 250 m,两坡明显不对称,向海坡长而缓,倾角8 ~ 12°左右,向陆坡短和陡,倾角约28 ~ 32°。横向沙脊在强风作用下不断以年均1 ~ 2 m的速度向陆推移,形态也在不断变化,尤其是顶部变化较大,风沙流强度大、频率高。因此,考虑到河北昌黎黄金海岸海岸沙丘的典型性,横向沙脊规模大、自然和典型,顶部的风沙流活动明显,就选择在该区域横向沙脊的顶部进行不同输沙量下海岸沙丘表面风沙流结构及其沙物质构成的野外观测。

2.2 观测技术与方法

观测工作内容包括观测不同输沙量的风沙流结构和风沙流中不同高度气流搬运沙物质的粒度构成2个方面。

不同输沙量下风沙流结构的野外观测,采用了北京师范大学干旱与风沙灾害研究所的野外用梯度风速仪和平口式积沙仪,该梯度风速仪可测定不同高度的风速,风速的测量范围为0.3 ~ 30.0 m/s,分辨率为0.1 m/s,并配有数据采集器,结果以ASCII码数据输出且可直接用Excel软件进行统计分析;平口式积沙仪的总高度为85 cm,沙尘采集高度60 cm,采集梯度为30个连续的2 cm × 2 cm进沙口,即可采集共30层的集沙数据,采集效率大于80%。野外观测时间是2007年4月2 ~ 4日,观测所选择的横向沙脊高39.5 m、宽143.8 m,形态典型、规模高大。野外观测时风速仪和集沙仪同步观测,风速观测高度为5、15、30、60、120、180、280和380 cm,集沙仪取样时间间隔根据风速大小与集沙仪集沙情况等各有不同。

不同输沙量的风沙流中不同高度气流搬运沙物质粒度构成的测定,首先与风沙流结构观测同步进行,野外分层收集风沙流结构观测中集沙仪所采集到的沙物质样品;然后,实验室内经简单处理后,利用电子天平(精度0.001 g)称重记录获得不同

高度层的气流的沙尘搬运量,再利用 Malvern MS2000 激光粒度仪对其粒度分析。由此,可获得不同输沙量的风沙流中不同高度层气流搬运沙物质的总量及其沙粒粒度构成,亦即不同输沙量下不同粒径组的沙粒在风沙流中不同高度的分布数据,依此分析输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒垂向分布的影响。

3 观测结果及其分析

受野外实际观测条件的限制,无法获取风速完全相同以及大样本的不同输沙量下风沙流结构及其沙物质粒度构成的观测数据,但在下垫面性质相同和地表物质组成一致的同一观测点且风速相近条件下(表 1),观测到总输沙量差异较大的两组有效数据,即观测 D 和观测 F,其总输沙量分别为 8.378 和 15.695 $\text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 。对比总输沙量小的观测 D 和总输沙量大的观测 F 的风沙流中不同粒径在垂向上的绝对输沙量、相对输沙量与分布模式的变化,研究总输沙量变化对海岸沙丘表面风沙

流中不同粒径组沙粒输沙量垂向分布的影响。

表 1 横向沙脊顶部的风速梯度观测数据

Table 1 Data of field measurement of vertical change of wind velocity on the crest of coastal transverse ridge

高度/ cm		5	15	30	60	120
风速	观测 D	7.86	4.76	6.51	10.20	10.17
($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	观测 F	8.45	2.29	6.92	10.90	10.90

3.1 风沙流沙物质的粒度构成

野外观测点所处横向沙脊表面沙物质的粒径组成平均是粗沙、中沙与细沙分别占 2.67%、65.51% 和 31.82%,以中沙为主,平均粒径 1.632ϕ 。横向沙脊顶部风沙流沙物质的粒度构成(表 2),观测 D 中的粗沙、中沙与细沙分别占 1.63%、58.55% 和 39.51%,观测 F 中分别为 0.07%、51.14% 和 48.79%,粗沙、中沙与细沙所占比例在 99% 以上,故主要分析不同输沙量下这 3 种沙粒的垂向分布变化特点(图 1)。

表 2 横向沙脊顶部风沙流中沙物质的粒度构成

Table 2 Composition of sand grain size in the wind-sand flow on the crest of coastal transverse ridge

粒级/mm		极粗砂	粗砂	中砂	细砂	极细砂	粗粉沙
		2~1.0	1.00~0.50	0.50~0.25	0.25~0.10	0.10~0.05	0.05~0.01
粒度构成	观测 D	0.02	1.63	58.55	39.51	0.13	0.16
%	观测 F	0.00	0.07	51.14	48.79	0.00	0.00

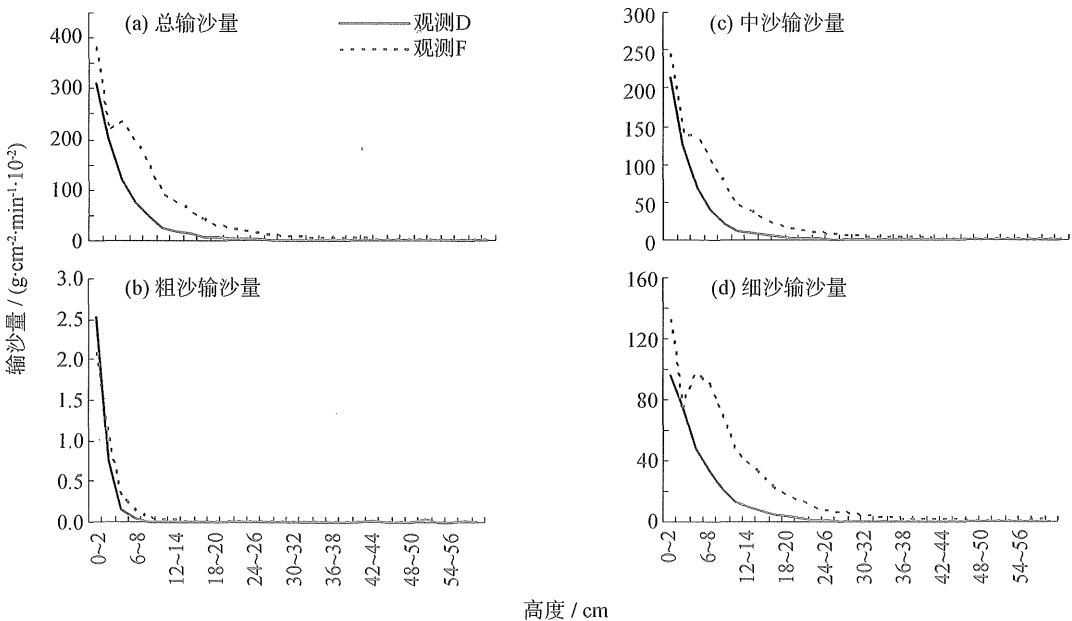


图 1 不同输沙量下风沙流中不同高度的输沙量

Fig. 1 Sand transport rate at different heights in the wind-sand flow at different total sand transport rates

3.2 粗沙垂向分布的变化

随着气流中总输沙量的增加(图1a、图1b),粗沙的绝对输沙量总量由总输沙量小的观测D的 $3.6459 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 变为总输沙量大的观测F的 $3.6205 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,观测F与观测D相比粗沙的总输沙量近于持平甚至略有减少。同时,风沙流中不同高度的绝对输沙量的变化也有不同,随总输沙量的增大,0~2 cm层的输沙量变化量最大,减少了 $0.436 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$;2~32 cm高度内各层的输沙量有不同程度的增加,其中主要增加在2~8 cm的高度层内;32~60 cm高度内各层的输沙量有不同程度的减少。

从不同高度气流层的输沙量占总输沙量比例的

相对输沙量(%)的变化看(表3),其变化与绝对输沙量的变化大致相同,即下层(0~2 cm)减少,减少了11.55%;中层(2~32 cm)增加,合计有14.99%;上层(32~60 cm)减少,共减少了3.44%。

随总输沙量的增加,粗沙输沙量在风沙流中的垂向分布模式也发生了一定的变化。对观测D和观测F的气流中搬运沙尘量(Q)与高度(h)之间关系的整体和分段拟合分析结果(表4),粗沙整体上呈现为负幂函数分布特点,尤其是在0~40 cm和0~60 cm高度内其垂向分布模式随总输沙量的增加转变为典型的负幂函数。

表3 不同输沙量下不同粒径组沙粒在不同高度的相对输沙量

Table 3 Ratio of sand transport rates at different heights in total sand transport rates for different sand grain sizes at different total sand transport rates %

高度 cm	粗沙			中沙			细沙		
	观测 D	观测 F	变化量	观测 D	观测 F	变化量	观测 D	观测 F	变化量
0~2	69.50	57.95	-11.55	41.56	27.52	-14.04	30.39	19.85	-10.54
2~4	20.49	26.77	6.28	24.38	15.55	-8.83	23.87	11.23	-12.64
4~6	4.50	8.35	3.85	13.39	15.08	1.69	15.14	14.51	-0.63
6~10	1.43	4.99	3.56	11.90	20.24	8.34	17.13	23.70	6.57
10~20	0.21	1.37	1.16	7.02	15.83	8.81	11.28	22.25	10.97
20~30	0.08	0.24	0.16	1.16	3.95	2.79	1.68	6.02	4.34
30~40	0.74	0.12	-0.62	0.23	1.13	0.90	0.27	1.60	1.33
40~60	3.02	0.19	-2.81	0.35	0.70	0.35	0.23	0.83	0.60

3.3 中沙垂向分布的变化

风沙流中中沙的绝对输沙量随总输沙量的增加由观测D的 $514.5103 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增至观测F的 $893.4208 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ (图1a, c),风沙流中不同高度的绝对输沙量也随总输沙量的增大有不同程度的增加,其中尤以4~10 cm高度内的输沙量增加最大,0~2 cm和10~12 cm高度的增加次之,在10 cm高度以上各层绝对输沙量的增加量随高度增加而逐渐降低。

中沙在不同高度气流层内的相对输沙量的变化与绝对输沙量的变化大致相同(表3),即下层(0~4 cm)减少、上层(4~60 cm)增加或基本持平,总增加或减少的变化量为22.87%。

中沙在不同高度气流层内输沙量的垂向变化总体上表现为指数函数分布(表4),尤其是在0~20 cm高度内和0~40 cm高度内其垂向分布是典型的指数函数分布模式,其在0~60 cm高度内的

分布随总输沙量的增加也由负幂函数分布转变为指数函数分布。

3.4 细沙垂向分布的变化

随总输沙量增加风沙流中细沙的绝对输沙量由观测D的 $317.3503 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 增至观测F的 $672.4292 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ (图1a, d),细沙的总输沙量增加了 $355.0789 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$,随之风沙流中不同高度的绝对输沙量也基本持平或有不同程度的增加,其中尤以4~10 cm高度内的输沙量增加最大,0~2 cm和10~12 cm高度的增加次之,在10 cm高度以上各层输沙量的增加量随高度增加而逐渐降低。细沙在风沙流中不同高度的输沙量的垂向分布随总输沙量的增加几无变化,符合典型的指数函数分布模式(表4)。

细沙的相对输沙量随总输沙量的增大也基本呈现为下层减少和上层增加的变化特点(表3),具

表 4 不同输沙量下风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量与高度之间拟合结果
Table 4 Coupling relation formulas between sand transport rate and height of different sand grain sizes
in the wind-sand flow at different total sand transport rates

粒径	高度/cm	观测样本	指数函数		幂函数	
			公式	相关系数	公式	相关系数
粗沙	0 ~ 20	观测 D	$Q = 2.3515e^{-0.9138h}$	0.900 2	$Q = 5.5577h^{-3.8968}$	0.959 6
		观测 F	$Q = 2.8065e^{-0.7263h}$	0.956 5	$Q = 4.7541h^{-2.9937}$	0.952 5
	0 ~ 40	观测 D	$Q = 0.0621e^{-0.2456h}$	0.332 5	$Q = 0.9209h^{-2.492}$	0.645 9
		观测 F	$Q = 0.4873e^{-0.3957h}$	0.856 9	$Q = 5.0167h^{-3.0645}$	0.969 7
	0 ~ 60	观测 D	$Q = 0.013e^{-0.0589h}$	0.059 0	$Q = 0.1624h^{-1.3829}$	0.303 0
		观测 F	$Q = 0.1069e^{-0.2247h}$	0.666 7	$Q = 2.794h^{-2.7106}$	0.905 7
中沙	0 ~ 20	观测 D	$Q = 285.14e^{-0.4742h}$	0.987 5	$Q = 381.35h^{-1.9192}$	0.948 2
		观测 F	$Q = 321.88e^{-0.3116h}$	0.988 5	$Q = 365.04h^{-1.2178}$	0.885 3
	0 ~ 40	观测 D	$Q = 171.87e^{-0.3796h}$	0.983 0	$Q = 953.21h^{-2.6921}$	0.933 1
		观测 F	$Q = 268.06e^{-0.2787h}$	0.994 0	$Q = 842.8h^{-1.9234}$	0.893 7
	0 ~ 60	观测 D	$Q = 52.386e^{-0.2465h}$	0.818 9	$Q = 925.55h^{-2.689}$	0.909 7
		观测 F	$Q = 162.21e^{-0.2253h}$	0.935 7	$Q = 1471.4h^{-2.2893}$	0.901 6
细沙	0 ~ 20	观测 D	$Q = 154.45e^{-0.3977h}$	0.997 1	$Q = 182.63h^{-1.5593}$	0.898 2
		观测 F	$Q = 172.96e^{-0.2243h}$	0.935 6	$Q = 180.08h^{-0.8436}$	0.775 4
	0 ~ 40	观测 D	$Q = 135.92e^{-0.3774h}$	0.996 0	$Q = 617.76h^{-2.5871}$	0.883 4
		观测 F	$Q = 198.96e^{-0.2526h}$	0.991 3	$Q = 485.33h^{-1.6744}$	0.821 8
	0 ~ 60	观测 D	$Q = 52.556e^{-0.2733h}$	0.886 8	$Q = 899.17h^{-2.8433}$	0.895 7
		观测 F	$Q = 145.72e^{-0.2215h}$	0.955 2	$Q = 1037.6h^{-2.1684}$	0.854 3

体是 0 ~ 6 cm 高度内的相对输沙量减少, 6 ~ 60 cm 高度内基本持平或增加, 总增加或减少的变化量为 23.81%。

4 讨论与分析

分析总输沙量增大中不同粒径组沙粒输沙量垂向分布的响应变化差异, 主要原因是:

首先, 一定风速的气流能够搬运沙粒的最大粒径存在极限值, 在风速相近而总输沙量增加时, 气流搬运所增加的沙物质应是小于该风速最大搬运粒径的沙粒, 就本研究区域沙丘表面的沙物质组成与风速而言, 气流搬运增加的沙物质主要应是颗粒相对较细的沙粒, 即细沙和中沙, 故随总输沙量大幅度增加气流中中沙和细沙的搬运量增大, 但粗沙输沙量并无增加。同时, 由于总输沙量的增加会使沙粒之间的碰撞更频繁, 而沙粒在碰撞过程中能量损失的加大会降低沙粒的搬运高度^[2], 受该影响最大的应是粒径大的粗沙, 由此致使其垂向分布出现了上层减少的现象, 但中沙和细沙随总输沙量增大在不同高度的输沙量基本均有所增加。

其次, 不同粒径组沙粒的搬运高度差异明显, 一般粒径越细搬运高度越高, 随总输沙量增大粒径越细在风沙流上层的搬运量的增加量就会越多, 下

层输沙量相对减少量就越大, 造成沙粒越细相对输沙量在风沙流下层减少的数量与高度就越多和越高, 故粗沙、中沙与细沙的相对输沙量(%)在风沙流下层的减少量由 11.55% 升至 22.87% 和 23.81%, 而相对输沙量减少的气流层的高度也由 0 ~ 2 cm 升至 0 ~ 4 和 0 ~ 6 cm。同时, 受“象鼻”效应的作用与影响, 尤以 4 ~ 10 cm 高度内的输沙量增加最多。

另外, 运动方式不同的沙粒在风沙流中的垂向分布特征不尽一致。粗沙组沙粒主要集中在沙丘表层以蠕移方式运动, 集中发生于受沙丘表面微小形态影响而湍流集中发育的近表层, 湍流的主导作用会使其输沙量随高度的变化整体满足负幂律关系^[30]; 细沙大多以跃移的形式运动, 已有大量研究结果证实跃移沙粒输沙量垂线分布是单一指数递减函数^[2, 19-20, 31-32], 故细沙在风沙流中的垂向分布呈现为典型的指数函数分布模式; 中沙的运动方式随风速大小不同存在蠕移和跃移的变化, 风速大则跃移为主, 风速小则蠕移为主, 但本次观测时由于风速较高、风力较强会使其跃移成分较高, 故其垂向分布基本符合指数函数分布模式, 尤其是在 0 ~ 60 cm 高度内的分布随总输沙量的增加即跃移组分的增加由负幂函数分布转变为指数函数分布。

5 结 论

输沙量对海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒输沙量的垂向分布影响的观测结果表明, 随着气流搬运沙物质总量的增加, 在非均匀沙床面上不同粒径组沙粒的输沙量的垂向分布呈现出了不同的变化特点, 其中粗沙的输沙总量并无增加, 风沙流输沙量下层减少 (0~2 cm)、中层增加、上层减少, 其垂向分布随输沙量增加转变为典型负幂函数分布模式; 中沙, 随总输沙量的增大, 其在风沙流中不同高度的绝对输沙量均有增加, 相对输沙量的变化是下层 (0~4 cm) 减少、上层 (4~60 cm) 增加或基本持平, 其垂向分布基本符合指数函数分布模式, 尤其是在 0~60cm 高度内的分布随总输沙量的增加由负幂函数转变为指数函数; 随总输沙量的增大, 细沙输沙量总量和不同高度的输沙量有不同程度的增加或基本持平, 相对输沙量下层 (0~6 cm) 减少、上层 (6~60 cm) 基本持平或增加, 垂向分布符合典型的指数函数分布模式。该观测结果与吴正等^[2,15]、董治宝^[19]、邵亚平^[20]和冯大军^[21]等人的研究结果不尽相同, 反映出总输沙量增大中不同粒径组沙粒输沙量垂向分布变化的响应差异。究其原因, 主要应与不同风速气流的携沙极限以及不同粒径组沙粒的主导运动方式密切相关。

致谢: 本项研究得到了北京师范大学哈斯教授、邹学勇教授、刘连友教授等的大力支持, 黄德全、张小啸、郑影华、夏显东、付川、周娜和倪少春等参与了野外观测, 粒度样品分析得到华南师范大学地理科学学院实验室和李保生教授、温小浩博士的帮助, 特致谢忱。

参考文献:

- [1] BAGNOLD R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London: Methuen & Co, 1941: 1-265.
- [2] 吴正, 等. 风沙地貌与治沙工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003, 61-88.
- [3] 邹学勇, 董光荣. 风沙物理学的发展与展望. 地球科学进展 [J]. 1993, 8(6): 44-49.
ZOU Xuyong, DONG Guangrong. The development and prospect of physics of blown sand [J]. Advance in Earth Science, 1993 8(6): 44-49.
- [4] 李振山, 倪晋仁. 风沙流研究的历史、现状及其趋势. 干旱区资源与环境 [J]. 1998, 12(3): 89-97.
LI Zhenshan, NI Jinren. Aeolian sand transport processes [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 1998, 12(3): 89-97.
- [5] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年 (I) [J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 293-305.
- [6] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50a (II) [J]. 中国沙漠, 2005, 25(6): 795-815.
DONG Zhi, ZHENG Xiaojing. Research achievements in aeolian physics in China for the last five decades (II) [J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(6): 795-815.
- [7] CHEPIL W S. Dynamics of wind erosion: nature of movement of soil by wind [J]. Soil Science, 1945, 60: 305-320.
- [8] WILLIAMS G. Some aspects of aeolian transport load [J]. Sedimentology, 1964(3): 257-287.
- [9] NORDSTORM K, et al, ed. Coastal Dunes: Form and Process [M]. Chichester: John Wiley & Sons, 1990: 57-216.
- [10] BAMDORFF-NIELSEN O E, WILLETTS B B. Aeolian grain transport: (1) Mechanics; (2) The erosion environment [J]. Acta Mechanica Suppl. 1 and 2. New York: Springer-verlag, 1991.
- [11] CATER K W G, et al, ed. Coastal dunes: geomorphology, ecology and management for conservation [M]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1992: 33-42.
- [12] FRYREAR D W, SALEH A. Field wind erosion: vertical distribution [J]. Soil Science, 1993, 155: 294-300.
- [13] GREELEY R, BLUMBER D G, WILLIAMS S H. Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand [J]. Sedimentology, 1996, 43: 41-52.
- [14] A. И. 兹纳门斯基. 沙地风蚀过程的实验研究和沙堆防止问题 [M]. 杨郁华译. 北京: 科学出版社, 1960: 8-52.
- [15] 吴正, 凌裕泉. 风沙运动的若干规律及防止风沙危害问题的初步研究 [J]. 治沙研究, 1965(7): 7-14.
WU Zheng, LIN Yuquan. Research on some rules of wind-sand movement and its damages prevent [J]. Research of Wind-sand Control, 1965(7): 7-14.
- [16] 马世威. 风沙流结构的研究 [J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8-22.
MA Shiwei. Study on structure of wind-sand flow [J]. Journal of Desert Research, 1988, 8(3): 8-22.
- [17] BUTTERFIELD G R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport, high-resolution measurements in a wind tunnel [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 393-412.
- [18] DONG Z, LIU X, WANG H, et al. The flux profile of blowing sand cloud: a wind tunnel investigation [J]. Geomorphology, 2002, 49: 219-230.

- [19] DONG Zhibao, LIU Xiaoping, WANG Hongtao. Aeolian sand transport: a wind tunnel model [J]. *Sedimentary Geology*, 2003, 161 (1-2): 71-83.
- [20] SHAO Y P, MIKAMI M. Heterogeneous saltation: Theory, observation and comparison [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2005, 115: 359-379.
- [21] 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.
FENG Dajun, NI Jinren, LI Zhenshan. Vertical mass flux profiles of different grain size groups in Aeolian sand transport [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62 (11): 1194-1203.
- [22] 尹永顺. 砾漠大风地区风沙流研究[J]. *中国沙漠*, 1989, 9(4): 27-36.
YIN Yunshun. Study on sand drift in strong wind region in gravel desert [J]. *Journal of Desert Research*, 1989, 9(4): 27-36.
- [23] 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*, 2004, 49(11): 1099-1104.
HASI. Structural variations of sand-bearing airflow over dune at southeastern fringe of Tengger Desert [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(11): 1099-1104.
- [24] 傅启龙, 沙庆安. 昌黎海岸风成沙丘的形态与沉积构造特征及其成因初探[J]. *沉积学报*, 1994, 12(1): 98-104.
FU Qilong, SHA Qingan. Morphology sedimentary structural characteristics and genesis of the Chanli coastal dunes, Hebei Province [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(1): 98-104.
- [25] 吴正, 黄山, 胡守真, 等. 华南海岸风沙地貌研究[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 25-52.
- [26] 傅命佐, 徐孝诗, 徐小微. 黄、渤海海岸风沙地貌类型及其分布规律和发育模式[J]. *海洋与湖沼*, 1997, 28 (1): 56-65.
FU Mingzuo, XU Xiaoshi, XU Xiaowei, et al. The Aeolian geomorphical types in the coastal areas of the Yellow Sea and Bohai Sea, and their distribution patterns and development models [J]. *Oceanologia & Limnologia Sinica*, 1997, 28(1): 56-65.
- [27] 董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2006, 26(4): 99-104.
DONG Yuxiang. The coastal aeolian geomorphic types and their distribution pattern in China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, 26(4): 99-104.
- [28] 董玉祥. 中国海岸风沙研究: 进展与展望[J]. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 26-35.
DONG Yuxiang. Coastal Aeolian research in China: progress and prospect [J]. *Progress in Geography*, 2006, 25(2): 26-35.
- [29] 胡镜荣, 顾建清, 等. 自然保护区可持续发展概论[M]. 北京: 科学出版社, 1996: 55-81.
- [30] 李后强, 艾南山. 风沙湍流的间隙性、稳定性及分形特征[J]. *中国沙漠*, 1993, 13(1): 11-20.
LI Houqiang, AI Nanshan. The intermittency, stable distribution and fractal characteristic for the wind-sand turbulent flow [J]. *Journal of Desert Research*, 1993, 13(1): 11-20.
- [31] NI J R, LI Z S, MENDOZA C. Vertical profiles of aeolian sand mass flux [J]. *Geomorphology*, 2002, 49: 205-218.
- [32] 李振山, 张琦峰. 风沙流的输沙率沿程变化规律[J]. *中国沙漠*, 2006, 26(2): 199-193.
LI Zhenshan, ZHANG Qifeng. Evolution of streamwise sand transport with distance [J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(2): 199-193.