

# 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面 风沙流结构变异

陶彬彬, 刘 丹, 管 超, 哈斯额尔敦\*

(北京师范大学资源学院 北京 100875)

**摘 要:**对库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面气流和输沙率的野外观测和分析结果表明,沙丘表面约90%的风沙输移集中在距沙面0.10 m高度范围内,输沙率随高度递减的形式在沙丘各部位因风速、下垫面状况和坡面形态不同而发生变异。沙丘迎风坡脚因出露坚硬、含砾石地表,颗粒跃移高度大,风沙流上层相对输沙率大;迎风坡沙粒沿坡向上运动,颗粒跃移高度减小,风沙流中近地表相对输沙率大;沙丘背风坡沙粒沿坡向下运动,加之来自丘顶变型跃移物质的影响,风沙流上层相对输沙率较大;脊线受迎风坡各个断面地形差异的影响,各观测点间风沙流结构差异显著。风沙流结构在迎风坡和丘顶均遵循指数递减规律( $Q=ae^{-z/b}$ ),其中,指数函数拟合中系数 $a$ 与输沙率具有良好的幂函数关系,随风速增加而增加,但二者关系较弱; $b$ 与二者无相关性。背风坡风沙流结构具有明显的分段现象,以0.10 m高度为界,下层符合指数函数,上层符合幂函数。

**关 键 词:**抛物线形沙丘;风沙流结构;函数拟合;库布齐沙漠

## 1 引言

风沙流结构,即输沙量随高度的分布形式和变化规律,是近地面输沙强度评估和防沙治沙工程布设的重要参数之一(吴正等, 2010)。自20世纪40年代以来,随着野外观测技术的不断进步、风洞实验的逐渐完善以及计算机模拟技术的高速发展,各国学者在风沙流结构研究中取得了丰硕成果。近年来,中国学者对风沙流结构进行了大量野外观测和风洞实验,如在戈壁(尹永顺, 1989; 邹学勇等, 1995; 屈建军等, 2005; 张克存等, 2005)、塔克拉玛干沙漠(杜鹤强等, 2012; 韩致文等, 2012; 杨兴华等, 2012)、腾格里沙漠(哈斯, 2004; 张正偲等, 2013; Dong et al, 2014)、乌兰布和沙漠(何京丽等, 2012; 刘芳等, 2014)、毛乌素沙地(吴晓旭等, 2011; 包岩峰等, 2013)、浑善达克沙地(刘树林等, 2006; 张广等, 2006)、科尔沁沙地(张华等, 2002)、华北耕地(哈斯,

1997; 王仁德等, 2009; 牛艳频, 2011)、东部海岸(陈方等, 1997; 董玉祥等, 2008, 2009)等进行的研究,探讨了风速、输沙量以及下垫面状况对风沙流结构的影响。一般认为,风沙流结构呈指数函数(Williams, 1964; Anderson et al, 1988, Dong et al, 2014)或幂函数(Fryrear et al, 1991; 何京丽等, 2012)形式,随下垫面等因素的改变,风沙流结构发生不同程度的变异,呈多项式甚至分段函数形式。例如,受地表沉积物粒度影响,戈壁地表甚至新月形沙丘表面的风沙流结构出现“象鼻效应”(屈建军等, 2005; 张克存等, 2005; 杜鹤强等, 2012; 韩致文等, 2012);受地表植被影响,风沙流中输沙率随高度递减速度小,风沙流结构出现“双峰”现象(刘树林等, 2006)。但目前尚未发表关于库布齐沙漠地表风沙流结构的研究报告。

已有的实验观测通常在风洞或者野外平坦地表(沙丘丘顶或丘间地)进行,关于沙丘坡面上不同

收稿日期:2015-04;修订日期:2015-08。

基金项目:国家自然科学基金项目(41171002,41271020) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No. 41171002, No.41271020]。

作者简介:陶彬彬(1989-),女,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为风沙地貌,E-mail: taobb@mail.bnu.edu.cn。

通讯作者:哈斯额尔敦(1964-),男,教授,主要研究方向为干旱区地貌,E-mail: hasi@bnu.edu.cn。

引用格式:陶彬彬, 刘丹, 管超, 等. 2016. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面风沙流结构变异[J]. 地理科学进展, 35(1): 98-107. [Tao B B, Liu D, Guan C, et al. 2016. Variation of aeolian sediment flux profiles on a parabolic dune at the southern fringe of the Hobq Desert[J]. Progress in Geography, 35(1): 98-107.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.01.011

部位的风沙流结构(哈斯, 2004; 杜鹤强等, 2012; 韩致文等, 2012; Dong et al, 2014)研究尚不充分。沙丘坡面地形的抬升作用使气流发生变异, 近地表风速廓线偏离对数, 所得风速不能准确计算与输沙率密切相关的表面剪切风速; 加之受沙源丰寡的影响, 风速与输沙率的关系明显改变。因此, 受坡面气流和沙源的共同影响, 风沙流结构发生变异, 这将直接影响当地输沙强度的计算精度以及防沙治沙工程布设的有效性(Butterfield, 1999; Rotnicka, 2013)。因此探究不同环境中风沙流结构的变异情况在沙漠化治理中具有重要的理论和应用价值。

由于界面尺度的限制, 目前还不能在风洞中开展较大沙丘的模拟实验, 在野外对风沙流结构进行直接观测仍是获取实测资料和检验理论的重要手段。本文在库布齐沙漠南缘对典型抛物线形沙丘表面风沙流结构进行观测, 探讨了该类型沙丘表面风沙流结构特征及其变异程度, 以及用风沙流结构拟合函数进行输沙率估算的精度, 以期库布齐沙漠的防沙治沙工程提供一定理论依据。

## 2 研究区域概况和研究方法

### 2.1 研究区域概况

研究区位于库布齐沙漠南缘的覆沙台地, 地势南高北低, 平均海拔 1238 m, 地表景观以油蒿灌丛地、片状沙丘地与多条由暂时性流水沟谷相间为特色。该区属温带荒漠草原气候, 根据杭锦旗气象站多年观测数据, 年均温为 5.7 °C, 年均降水量为 277 mm 且集中于夏季, 年均蒸发量为 2400 mm, 全年盛行 WNW 风, 年均风速  $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 年均大风天数为 30 d, 风沙活动主要发生在 3-5 月, 输沙势(DP)为 201.60 VU, 合成输沙势(RDP)为 142.99 VU, 合成输沙方向为 111.38°。

观测沙丘为典型抛物线形沙丘, 位于一条南北走向干河床东侧, 四周被油蒿灌丛包围(图 1)。沙丘平面形态呈向西开口的 U 型, 南北两翼近乎平行, 走向为 WNW-ESE, 与合成输沙方向一致, 沙丘长 230 m, 宽 138 m, 高约 3 m。根据该沙丘的形态特征, 可分为前端活动区、南北两翼和翼间平地等三个地貌单元。前端活动区为裸沙区, 基本无植被覆盖, 迎风坡坡度在 3~12°之间; 背风坡发育小型滑落面, 丘顶与滑落面之间平缓(0~4°); 南、北两翼内侧坡较缓(2~8°)无植被, 外侧坡较陡(6~15°)且坡脚到翼脊分布油蒿灌丛, 南翼已发育油蒿灌丛沙丘; 翼间平地发育不同年龄阶段的油蒿灌丛, 在接近沙丘坡脚的裸露地表比较坚硬且有蚀余碎石散布。沙丘沉积物以细、中砂为主, 平均粒径为 0.185 mm, 分选较好(图 2)(吴霞等, 2012)。

### 2.2 研究方法

风沙观测于 2010 年 4 月下旬进行, 当时研究区正处于风沙活动强烈的时期。风速观测采用长春气象局研制的三杯风速传感器, 风杯距地表高度 0.40 m, 数据采集系统为美国坎贝尔公司生产的 CR1000, 观测期间风向为 WNW-NW; 输沙率观测仪器为原中国科学院兰州沙漠研究所研制的阶梯式集沙仪, 可观测 0.02 m 宽度和距地表 0.20 m 高度范围内的输沙通量。为避免集沙仪对气流的干扰, 每个观测点处的集沙仪与风速计相距 1.00 m。

抛物线形沙丘表面形态复杂, 故选择不同特征断面进行观测(图 1), 图中 A-G 分别表示脊线的 7 个观测点, H-L 分别表示前端活动区的迎风坡坡脚、迎风坡下部、迎风坡上部、丘顶和滑落面顶, P(p)-T(t) 依次表示翼角北侧坡脚、北侧坡中、翼顶、南侧坡中、南侧坡脚。由于仪器数量有限, 观测按不同地貌单元分三次进行: 前段活动区的 3 个纵断面、两翼和脊线, 其中 3 个纵断面同时观测, 共进行四次观

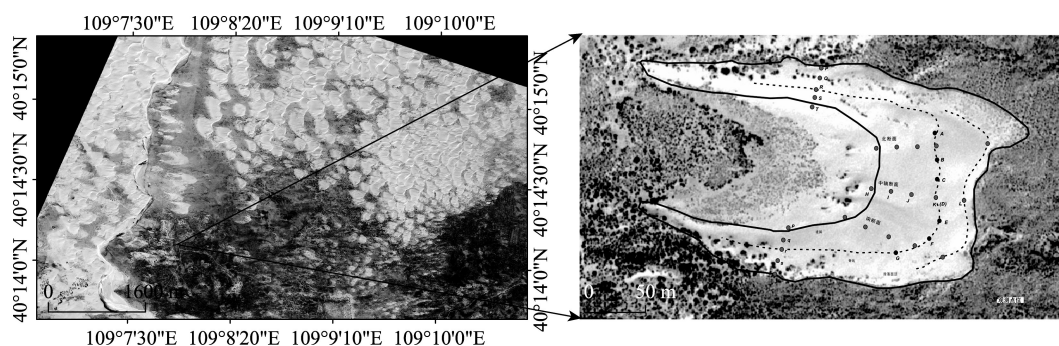


图1 研究区地理位置和抛物线形沙丘及观测点位示意图

Fig.1 Location of the study area and the parabolic dune with measurement spots

测,时间为12:16-15:01;两翼进行两次观测,时间为同日16:35-17:35,脊线进行两次观测,时间为次日11:11-12:12,每次观测时间依据风速大小决定,风速与输沙率观测同步进行。集沙物质用自封袋分层收集,在室内自然晾干后用电子天平称重(精度

为0.001 g)并记录,获得每层单宽输沙率(单位为 $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )。距地表0.40 m的起沙风速 $3.20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,因此选取大于 $3.20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的风速作为有效风速。

3 结果与分析

表1是沙丘不同部位风沙流结构的平均状况。输沙率和风速沿迎风坡向上依次增加,至丘顶达到最大值,在滑落面顶减小。除坡脚外,沙丘前端活动区各纵断面上其他部位输沙率随高度变化趋势相似,距地表0.04 m内的相对输沙率为68%~72%,0.10 m内的为91%~93%,风沙流结构上层稳定;坡脚输沙率随高度增加的递减程度小,约48%的输沙率集中在近地表0.04 m内,77%集中在0.10 m内。脊线上各观测点风沙流结构也存在差异,距地表0.04 m内的相对输沙率42%~79%,0.10 m内的为77%~97%,波动程度大。两翼上,南翼两侧坡面输沙率差异远大于北翼,北翼和南翼距地表0.04 m内的相对输沙率比例分别为53%~80%、39%~69%,

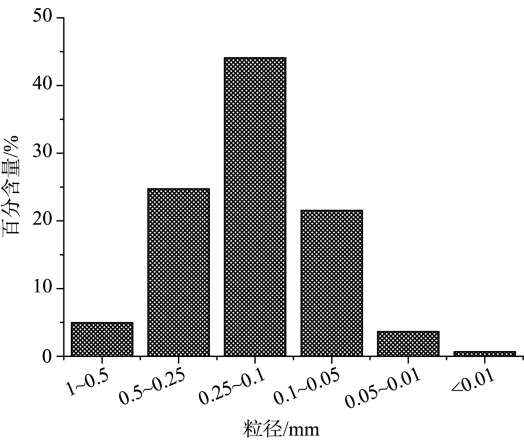


图2 沙丘表面沉积物粒度频率图(吴霞等, 2012)  
Fig.2 Grain size composition of surface sedimentary particles on the parabolic dune(Wu et al, 2012)

表1 抛物线形沙丘不同部位的相对输沙率

Tab.1 Relative sediment transport rate of different positions on the parabolic dune												
高度 /m	前端活动区相对输沙率/%					脊线相对输沙率/%						
	H'	I	J	K	L	A	B	C	D	E	F	G
0.01	29.94	44.88	43.18	41.07	49.80	40.77	29.85	54.42	53.17	22.12	56.91	33.83
0.03	18.29	22.89	27.71	27.28	21.79	21.07	22.29	24.57	19.75	19.59	19.40	18.41
0.05	13.16	12.10	12.26	13.08	10.67	13.77	15.18	10.77	11.38	16.54	9.01	10.95
0.07	9.30	6.98	6.07	6.95	5.83	8.94	10.21	4.90	5.81	12.95	4.97	7.77
0.09	7.41	4.14	3.60	3.93	3.42	5.71	7.15	2.50	3.37	9.65	3.19	6.15
0.11	6.66	2.72	2.36	2.60	2.35	3.51	5.29	1.25	2.23	6.70	2.26	5.20
0.13	4.77	2.10	1.60	1.78	1.82	2.48	3.66	0.67	1.53	4.63	1.50	5.25
0.15	3.85	1.57	1.25	1.34	1.60	1.67	2.75	0.42	1.16	3.44	1.10	4.35
0.17	3.39	1.34	1.03	1.05	1.41	1.18	2.03	0.28	0.88	2.48	0.94	4.04
0.19	3.22	1.28	0.94	0.91	1.33	0.91	1.58	0.23	0.71	1.91	0.72	4.04
总输沙率/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	2.85	7.04	13.50	16.94	9.72	0.97	1.75	5.53	2.40	8.66	4.33	0.64

高度/m	北翼相对输沙率平均值/%					南翼相对输沙率平均值/%				
	P	Q	R	S	T	p	q	r	s	t
0.01	0.293	0.326	0.445	0.610	0.352	0.224	0.386	0.335	0.397	0.452
0.03	0.233	0.226	0.265	0.193	0.216	0.162	0.226	0.218	0.297	0.185
0.05	0.128	0.152	0.130	0.083	0.135	0.126	0.130	0.147	0.123	0.095
0.07	0.084	0.095	0.065	0.040	0.086	0.100	0.085	0.099	0.064	0.068
0.09	0.065	0.060	0.035	0.024	0.064	0.100	0.058	0.067	0.039	0.048
0.11	0.048	0.046	0.021	0.016	0.044	0.062	0.039	0.045	0.027	0.040
0.13	0.043	0.032	0.013	0.011	0.034	0.052	0.029	0.034	0.018	0.032
0.15	0.039	0.025	0.010	0.009	0.027	0.057	0.021	0.023	0.014	0.030
0.17	0.034	0.021	0.008	0.007	0.024	0.063	0.015	0.018	0.012	0.026
0.19	0.033	0.018	0.007	0.007	0.019	0.055	0.012	0.013	0.009	0.025
总输沙率/( $\text{g}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	0.91	9.88	13.45	7.57	2.44	0.32	5.71	26.14	21.30	3.76

注:\*表格中各字母代表沙丘不同部位的观测点,具体位置如图1所示。



0.10 m内的为80%~95%、71%~92%,且两翼南侧近地表的相对输沙率均较北侧大。整体上,随输沙率增加,距地表0.10 m内的相对输沙率增加。

图3为沙丘各部位风沙流结构情况。从图3可以看出,各个观测部位的风沙流结构均发生不同程度变异,随输沙率或者风速减小,风沙流结构变异

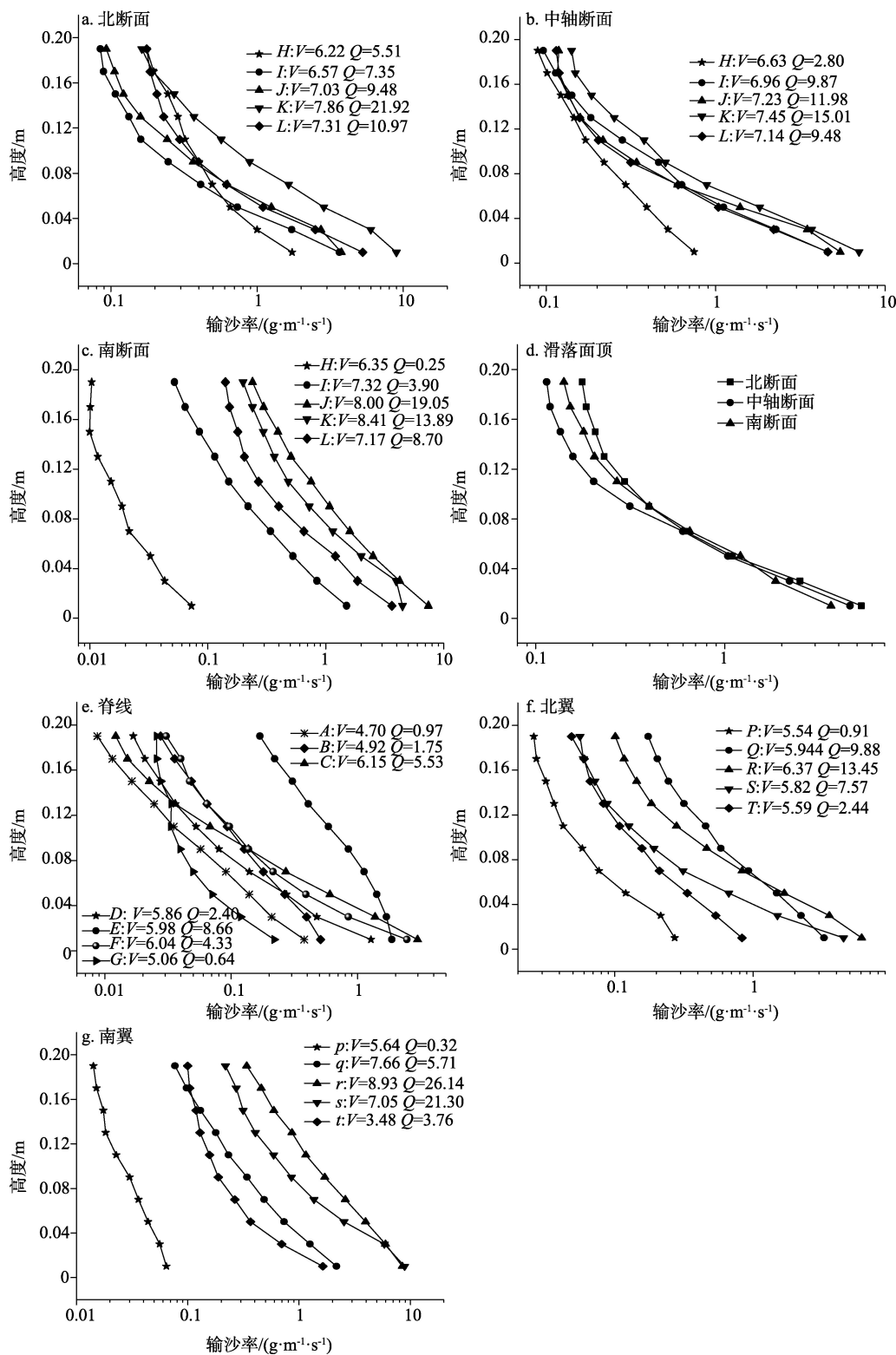


图3 沙丘各部位风沙流结构

Fig.3 Aeolian sediment flux profiles of different positions on the dune

程度增加。前端活动区3个纵断面的风沙流结构各不相同,坡面上各点风沙流曲线接近直线,丘顶输沙率大,输沙率随高度递减程度大;坡脚风速小、输沙率小,输沙率随高度递减速度慢且风沙流结构较紊乱;背风侧的滑落面顶,风沙流结构具有明显的分段现象,距地面0~0.08 m内呈直线,0.08 m以上呈非直线。在脊线,当风速较大时,风沙流结构在近地表为指数偏小型,风速小时为指数偏大型。在两翼,不同部位风沙流曲线大致平行,风沙流结构差异显著。

虽然沙丘各部位风沙流结构发生变异,但整体上仍符合指数函数( $Q=a\exp(-z/b)$ )递减规律(表2),观测点中函数拟合优度大于0.95( $P<0.01$ )约91%。

其中, $a,b$ 为拟合系数, $a$ 的取值范围为0.07~12.07,最大值和最小值都出现在南翼; $b$ 的取值范围为0.02~0.10,最大值出现在南翼北侧坡脚,最小值出现在北翼南侧坡中。研究认为,沙丘背风坡的风沙流结构下层为指数函数,上层为幂函数(哈斯,2004)。根据半对数图上背风坡风沙流结构特点,以0.08~0.10 m为界进行分段拟合,结果显示(表3),分段拟合提高了风沙流结构下层的拟合精度,降低了上层的拟合精度。

4 讨论

风速(Butterfield, 1999; 董玉祥等, 2009)、沙源

表2 沙丘不同部位风沙流结构的函数拟合情况  
Tab.2 Results of the regression analyses for the aeolian sediment flux profiles

沙丘部位	观测点位	$V/(m\cdot s^{-1})$	$Q_m/(g\cdot m^{-1}\cdot s^{-1})$	$a$	$b$	$Q_{ci}$	$Q_{ci}-Q_m$	$R^2$
北断面	$H$	6.22	5.51	1.918	0.056	5.214	-0.301	0.95
	$I$	6.57	7.35	5.295	0.027	6.934	-0.419	1.00
	$J$	7.03	9.48	5.114	0.038	9.537	0.058	0.98
	$K$	7.86	21.92	12.035	0.037	21.967	0.043	0.99
	$L$	7.31	10.97	7.531	0.028	10.145	-0.828	0.99
中轴断面	$H$	6.63	2.80	0.828	0.071	2.757	-0.047	0.99
	$I$	6.96	9.87	6.301	0.030	9.362	-0.507	1.00
	$J$	7.23	11.98	7.637	0.032	11.977	-0.001	0.99
	$K$	7.45	15.01	9.740	0.030	14.548	-0.462	1.00
	$L$	7.14	9.48	6.513	0.028	8.996	-0.485	1.00
南断面	$H$	6.35	0.25	0.079	0.062	0.235	-0.011	0.95
	$I$	7.32	3.90	1.882	0.041	3.759	-0.144	0.99
	$J$	8.00	19.05	9.379	0.040	18.370	-0.676	1.00
	$K$	8.41	13.89	5.921	0.048	14.007	0.112	0.96
	$L$	7.17	8.70	4.724	0.036	8.269	-0.435	0.99
北翼	$P$	5.54	0.91	0.333	0.055	0.883	-0.024	0.97
	$Q$	5.94	9.88	3.989	0.050	9.739	-0.137	1.00
	$R$	6.37	13.45	8.402	0.032	13.335	-0.116	1.00
	$S$	5.82	7.57	7.409	0.020	7.030	-0.545	1.00
	$T$	5.59	2.44	1.012	0.048	2.363	-0.077	0.99
南翼	$p$	5.64	0.32	0.072	0.104	0.318	-0.001	0.99
	$q$	7.66	5.71	2.711	0.041	5.482	-0.224	0.99
	$r$	8.93	26.14	10.396	0.052	26.081	-0.063	1.00
	$s$	7.05	21.30	12.075	0.035	20.986	-0.312	0.99
	$t$	3.48	3.76	2.219	0.030	3.244	-0.520	0.96
脊线	$A$	4.70	0.97	0.473	0.041	0.950	-0.021	1.00
	$B$	4.92	1.75	0.619	0.059	1.749	0.003	1.00
	$C$	6.15	5.53	4.428	0.025	5.493	-0.039	1.00
	$D$	5.86	2.40	1.910	0.024	2.229	-0.173	0.99
	$E$	5.98	8.66	2.290	0.085	8.806	0.147	0.97
	$F$	6.04	4.33	3.937	0.021	3.962	-0.371	0.99
	$G$	5.06	0.64	0.253	0.047	0.583	-0.061	0.93

注: $a,b$ 为风沙流结构的指数函数拟合系数, $Q_m$ 为观测输沙率, $Q_{ci}$ 为指数函数计算所得输沙率, $R^2$ 为拟合优度。

表3 滑落面顶分段函数拟合与连续函数拟合结果的对比

Tab.3 Comparison between continuous exponential function and discontinuous function for aeolian sediment flux profiles at the dune brink

观测断面	连续函数			分段函数		
	$Q_m$	0~0.20 m 指数	$Q_{c1}$	0~0.10 m 指数	0.10~0.20 m 幂函数	$Q_{c2}$
N	10.797	0.992	10.145	0.998	0.969	10.886
M	9.367	0.996	8.996	0.999	0.952	9.426
S	8.563	0.991	8.269	0.993	0.973	8.656

注:  $Q_{c1}$  为单一指数函数计算所得输沙率,  $Q_{c2}$  为以 0.01 m 高度为界的分段函数计算所得输沙率。

供应量(张伟民等, 2009)、下垫面状况(Lancaster et al, 1998; 陈智等, 2010)等因素通过影响地表输沙量而改变风沙流结构。沙丘表面的情况更加复杂, 风沙流结构由沙丘形态特征、微地貌以及风沙运动的力学性质共同决定(韩致文等, 2012)。

地表起伏改变沉积物颗粒跃移轨迹, 沿坡向上运动时, 颗粒跃移高度小于平坦地表, 风沙流下层输沙率相对增加, 上层则相对减小(Iversen et al, 1994; 哈斯, 2004), 故迎风坡的输沙率随高度的递减速度大。迎风坡坡脚因沙丘前移而出露平坦坚硬的含砾石地表, 增大了沉积物跃移高度, 风沙流上层相对输沙率增加, 输沙率随高度的递减速度减小。丘顶到背风侧滑落面顶坡面平缓, 下坡运动趋势小, 跃移高度增加不明显, 加之风速减小, 近地表相对输沙率增加。地表起伏形态影响风沙流结构(吴正等, 2010)。迎风坡3个纵断面之间地形起伏情况和各观测点的微地貌不同, 故即使同一部位的风沙流结构也存在差异。气流具有呈股流沿坡向上流动的特征(Baas et al, 2005; Baas, 2008), 脊线上各观测点受气流股流结构的影响程度不同, 故风沙流结构存在显著差异且发生不同程度变异。受抛物线形沙丘形态特征的影响, 盛行风与两翼脊线小角度斜交甚至平行, 使得两翼具有线形沙丘动力学性质, 背风坡发生侧蚀。翼角北侧为迎风坡, 受上风向植被的屏障作用, 风沙流中含沙量小, 风沙流下层相对输沙率小, 故输沙率递减速度小; 南侧为背风坡, 旁侧气流的存在加强了翼角南侧坡脚的侵蚀作用, 同时, 颗粒沉积物粒沿翼脊走向输移, 跃移高度变化, 相对输沙率在近地表大, 在风沙流上层小, 故输沙率递减速度大。

库布齐沙漠抛物线形沙丘表面风沙流结构变异程度小。与塔克拉玛干沙漠新月形沙丘(细沙和极细沙为主)相比, 库布齐沙漠抛物线形沙丘表面

沙物质粒径(细沙和中沙为主)较大(王训明等, 2001; 吴霞等, 2012); 韩致文等在新月形沙丘迎风坡坡脚和丘顶发现“象鼻效应”, 但我们没有在抛物线形沙丘上(包括迎风坡坡脚)观察到“象鼻效应”。沙丘两翼的风沙流结构受灌丛影响发生变异, 但未出现半固定沙地上的双峰现象(刘树林等, 2006)。该沙丘背风坡的风沙流结构具有分段现象, 这与哈斯(2004)、杜鹤强等(2012)的研究结果一致。

输沙率随高度增加减小是毋庸置疑的事实, 但关于风沙流结构的具体形式众说纷纭。相对风洞实验而言, 风沙流野外观测的结果复杂多变, 蠕移质、沉积物粒度和地表粗糙度等因素都导致风沙流结构发生较大程度变异而偏离指数函数形式(Butterfield, 1999; Ni et al, 2003)。许多学者提出分段拟合风沙流结构, 并得出各种形式的分段函数(哈斯, 1997; 董玉祥等, 2009; 韩致文等, 2012)。

根据半对数坐标图上风沙流结构曲线特征, 选择单一指数函数方程进行拟合, 效果良好(表2)。不同的学者对指数函数( $Q=a\exp(-z/b)$ )中系数  $a$ ,  $b$  有不同的见解。其中  $a$  的物理意义尚未明确, 有研究认为  $a$  代表风沙流中蠕移质的含量(Dong, 2002; Zheng, 2004; Dong et al, 2014)或者风沙流浓度的最大值(王洪涛等, 2004);  $1/b$  为输沙率随高度的递减率, 反映风沙流结构中输沙率变化的整体趋势。风洞实验结果认为,  $a$  随风速增加而减小,  $b$  则相反(Dong et al, 2007)。但是, 在复杂的自然环境中,  $a$ 、 $b$  与风速和输沙率的关系发生变化(图4)。 $a$  随风速变大呈增加趋势, 与输沙率具有良好的幂函数关系; 与观测输沙率  $Q_m$  的比值范围为 23%~98%, 显然,  $a$  不可能代表蠕移质的含量。 $b$  值与风速和输沙率均无相关性, 间接说明  $b$  还受其他因子的影响, 如沙丘表面地表粗糙度、地表湿度和沉积物粒径等下垫面状况。但是, 将沙丘前端活动区的风速、输沙率、 $a$ 、 $b$  值取均值后发现, 各参数的变化趋势具有良好的同步性(表4)。可见, 风沙流结构特征及其与风速、输沙率的关系是气流与地表长期作用的结果, 若数据采集时间间距过短, 数据噪音干扰大, 可能掩藏风沙流结构与风速和输沙率等变量的关系, 因而适当延长观测时间和数据采集步长有助于揭示风沙流结构变化规律。

沙丘表面输沙率与风沙流高度呈函数关系, 沙粒的平均跃移高度反映风沙流的跃移强度, 通过以下公式, 可得出沙粒平均跃移高度与系数  $b$  的关系, 进而了解风沙流的跃移强度:

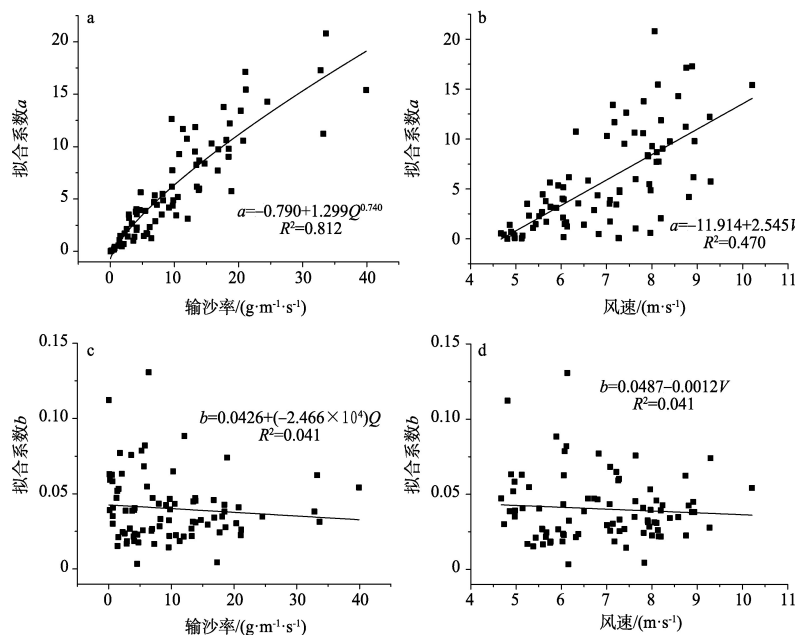


图4 指数函数拟合系数(a,b)与风速和输沙率的关系

Fig.4 Relationship between the parameters (a and b) and wind velocity and sediment transport rate

$$\bar{H} = \frac{\int_0^\infty Q(h)h d_h}{\int_0^\infty Q(h) d_h} = \frac{b[1 - (1 + \frac{1}{b})e^{-\frac{1}{b}}]}{1 - e^{-\frac{1}{b}}} \approx b(e^{-\frac{1}{b}} \approx 1)$$

式中： $\bar{H}$  为平均跃移高度； $h$  为风沙流高度； $Q(h)$  为输沙量； $d(h)$  是指积分标志。由上式可知，跃移高度与系数  $b$  的分布情况一致，即系数  $b$  为平均跃移高度的近似值(张正偲等, 2013)。据此可知，该沙丘表面沙粒跃移高度范围为 0.02~0.10 m。坡脚地表坚硬，沙粒的反弹作用大，跃移高度大，因此  $b$  值大；而沙丘坡中部位，受地表坡度和缺乏水分等多因素共同影响，沙粒跃移高度小，即  $b$  值小。

用风沙流结构的拟合函数所计算的输沙率( $Q_c$ )

表4 前端活动区风沙流结构拟合函数系数a,b的均值与风速和输沙率均值的关系

Tab.4 Relationship between the average values of the parameters a and b of regression analyses with exponential function and wind velocity and sediment transport rate at the dune's nose

观测点位	$V/(m \cdot s^{-1})$	$Q/(g \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	$a$	$b$
H	6.40	2.85	0.942	0.063
I	6.95	7.04	4.493	0.033
J	7.42	13.50	7.377	0.037
K	7.91	16.94	9.232	0.039
L	7.21	9.72	6.256	0.030

与观测输沙率( $Q_m$ )具有良好的线性关系(图5),说明指数函数对风沙流结构的拟合效果好。Rotnicka (2013)在波罗的海南部海岸的实验结果认为,风速大或者地表湿度大会导致拟合函数低估实际值( $Q_c - Q_m < 0$ )。本实验发现沙丘各个部位用单一指数函数方程计算所得的输沙率均低于实际输沙率;背风侧滑落面顶的风沙流结构用分段函数进行拟合,计算所得的输沙率与观测输沙率的差值  $Q_{c2} - Q_m > 0$ ,即分段函数方程计算结果高于实际输沙率,与用单一指数函数方程计算所得结果相反,且  $Q_{c2}$  更接近  $Q_m$ ,即

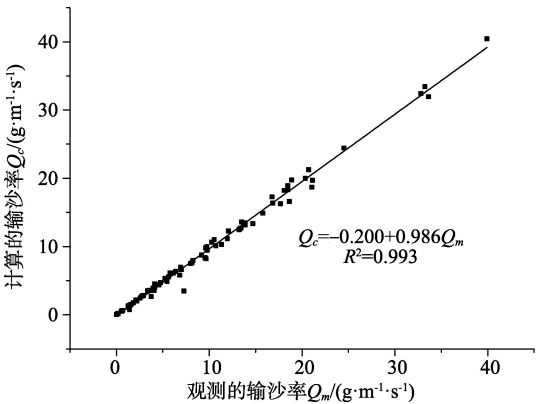


图5 指数函数拟合结果的精确度

Fig.5 Accuracy of regression analyses with exponential function



拟合函数对输沙率的低估或高估还与选用的函数形式有关,在沙丘背风侧用分段函数估算的输沙率精确度相对较高。

## 5 结论

根据上述分析与讨论,初步得出以下结论:

(1) 抛物线形沙丘沙源短缺,沙丘表面约62%输沙率集中在近地表0.04 m以内,约88%集中在0.10 m以内,总输沙率越大,风沙流下层相对输沙率越大,与平坦地表结论一致。说明无论沙源丰寡,风沙流都是一种贴近地表的沙物质搬运现象。

(2) 该沙丘表面各部位风沙流结构发生不同程度的变异,但各个部位发生变异的主导因素不尽相同:坡脚受坚硬的砾石地表影响;迎风坡受沙丘表面下垫面状况影响;背风坡以风速为主导因素;脊线上影响因素复杂,不仅受立地条件的影响,还受其所在坡面地形起伏的影响。

(3) 风沙流结构拟合函数的具体形式影响输沙率估计值精度。用指数函数拟合变异后的整体风沙流结构,其拟合优度高,但所得输沙率总是低于实际值。背风侧滑落面顶风沙流结构分段,大致以0.10 m为界,下层符合指数函数规律,上层符合幂函数递减规律,分段函数计算所得输沙率估算精度比单一指数函数高。风沙流结构指数函数拟合结果的系数 $a$ 、 $b$ , $a$ 取值范围为0.07~12.07,变化幅度大,与输沙率呈幂函数关系,随风速增加而增加,但无法表示蠕移质含量; $b$ 的取值范围为0.02~0.10,与风速或输沙率无显著相关性,能近似表示跃移高度,在地表坚硬的坡脚, $b$ 值大;在干燥疏松的迎风坡坡中和两翼坡中小, $b$ 值小。

## 参考文献(References)

包岩峰,丁国栋,吴斌,等. 2013. 毛乌素沙地风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 27(2): 118-123. [Bao Y F, Ding G D, Wu B, et al. 2013. Study on the wind-sand flow structure in Mu Us sand land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 27(2): 118-123.]

陈方,贺辉扬. 1997. 海岸沙丘沙运动特征若干问题的研究:以闽江口南岸为例[J]. 中国沙漠, 17(4): 355-361. [Chen F, He H Y. 1997. Research of several problems on movement characteristics of coastal dune sand: An example from the south coast of Min Jiang Estuary[J]. Journal of Desert Research, 17(4): 355-361.]

陈智,麻硕士,赵永来,等. 2010. 保护性耕作农田地表风沙

流特性[J]. 农业工程学报, 26(1): 118-122. [Chen Z, Ma S S, Zhao Y L, et al. 2010. Characteristics of drifting sand flux over conservation tillage field[J]. Transactions of the CSAE, 26(1): 118-122.]

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, et al. 2008. Field measurements of structure of wind-sand flow on coastal transverse ridge in China[J]. Scientia Geographica Sinica, 28(4): 507-512.]

董玉祥, 马骏. 2009. 风速对海岸沙丘表面风沙流结构影响的实证研究[J]. 干旱区资源与环境, 23(9): 179-183. [Dong Y X, Ma J. 2009. Field measurements of influence of total sand transport rate on the structure of wind-sand flow on the coastal transverse ridge[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 23(9): 179-183.]

杜鹤强, 韩致文, 王涛, 等. 2012. 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, 32(1): 9-16. [Du H Q, Han Z W, Wang T, et al. 2012. Variation of wind profile and sand flow structure above Barchan Dune[J]. Journal of Desert Research, 32(1): 9-16.]

哈斯. 1997. 河北坝上高原土壤风蚀物垂直分布的初步研究[J]. 中国沙漠, 17(1): 9-14. [Hasi E. 1997. Preliminary study on the vertical distributions of wind dust over Bashang plateau, Hebei Province[J]. Journal of Desert Research, 17(1): 9-14.]

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. [Hasi E. 2004. Structural variations of sand-bearing airflow over dune at southeastern fringe of Tengger Desert[J]. Chinese Science Bulletin, 49(11): 1099-1104.]

韩致文, 侯倩倩, 杜鹤强, 等. 2012. 新月形沙丘表面100cm高度内风沙流输沙量垂直分布函数分段拟合[J]. 地理科学, 32(7): 892-897. [Han Z W, Gou Q Q, Du H Q, et al. 2012. The piecewise fitting of sand flux vertical distribution of wind-sand flow within 100-cm height above the Barchan Dune Surface[J]. Scientia Geographica Sinica, 32(7): 892-897.]

何京丽, 郭建英, 邢恩德, 等. 2012. 黄河乌兰布和沙漠段沿岸风沙流结构与沙丘移动规律[J]. 农业工程学报, 28(17): 71-77. [He J L, Guo J Y, Xing E D, et al. 2012. Structure of wind-sand flow and law of dune movement along bank of Yellow River in Ulan Buh desert[J]. Transactions of the CSAE, 28(17): 71-77.]

刘芳, 郝玉光, 辛智鸣, 等. 2014. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠, 34(5): 1200-1207. [Liu F, Hao Y G, Xin Z M, et al. 2014. The surface Aeolian-sand flow structure in the Northeastern margin of the Ulanbuh Desert[J]. Journal of Desert Research, 34(5): 1200-1207.]

刘树林, 王涛, 郭坚. 2006. 浑善达克沙地春季风沙活动特征



- 观测研究[J]. 中国沙漠, 26(3): 356-361. [Liu S L, Wang T, Guo J. 2006. Characteristics of blown sand activities in Hunshandake sandy land in spring[J]. Journal of Desert Research, 26(3): 356-361.]
- 牛艳频. 2011. 河北坝上农田风沙流结构特征研究: 以康保县为例[D]. 石家庄: 河北师范大学. [Niu Y P. 2011. A study on the characteristics of sand flow structure in farmland of Bashang, Hebei Province: taking Kang Bao County for example[D]. Shijiazhuang, China: Hebei Normal University.]
- 屈建军, 黄宁, 拓万全, 等. 2005. 戈壁风沙流结构特性及其意义[J]. 地球科学进展, 20(1): 19-23. [Qu J J, Huang N, Ta W Q, et al. 2005. Structural characteristics of Gobi sand-drift and its significance[J]. Advances in Earth Science, 20(1): 19-23.]
- 王洪涛, 董治宝, 张晓航. 2004. 风沙流中沙粒浓度分布的实验研究[J]. 地球科学进展, 19(5): 732-735. [Wang H T, Dong Z B, Zhang X H. 2004. A study of the particle concentration in the sand flux-a wind tunnel investigation[J]. Advances in Earth Science, 19(5): 732-735.]
- 王仁德, 邹学勇, 吴晓旭, 等. 2009. 半湿润区农田风蚀物垂直分布特征[J]. 水土保持学报, 23(5): 39-43. [Wang R D, Zou X Y, Wu X X, et al. 2009. The vertical distribution characteristics of farmland wind-erosion dust over semi-humid region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 23(5): 39-43.]
- 王训明, 董治宝, 陈广庭. 2001. 塔克拉玛干沙漠中部分地区风沙环境特征[J]. 中国沙漠, 21(1): 56-61. [Wang X M, Dong Z B, Chen G T. 2001. Characteristics of blown sand environment in Middle Taklimakan Desert[J]. Journal of Desert Research, 21(1): 56-61.]
- 吴霞, 哈斯, 杜会石, 等. 2012. 库布齐沙漠南缘抛物线形沙丘表面粒度特征[J]. 沉积学报, 30(5): 937-944. [Wu X, Hasi E, Du H S, et al. 2012. Grain size distribution of parabolic dunes on the Southern fringe of Hobq Desert[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 30(5): 937-944.]
- 吴晓旭, 邹学勇, 王仁德, 等. 2011. 毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 31(4): 828-835. [Wu X X, Zou X Y, Wang R D, et al. 2011. Aeolian movement characteristics over different underlying surfaces in Mu Us Sandy Land[J]. Journal of Desert Research, 31(4): 828-835.]
- 吴正, 等. 2010. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社. [Wu Z, et al. 2010. Geomorphology of wind-drift sands and their controlled engineering[M]. Beijing, China: Science Press.]
- 杨兴华, 何清, 阿吉古丽·沙依提, 等. 2012. 塔克拉玛干沙漠北缘荒漠过渡带风沙流结构特征分析[J]. 干旱区研究, 29(4): 699-704. [Yang X H, He Q, Ajiguli S, et al. 2012. Study on structure of wind-blown sand flow over the desert ecotone in the Northern marginal zone of the Taklimakan desert[J]. Arid Zone Research, 29(4): 699-704.]
- 尹永顺. 1989. 砾漠大风地区风沙流研究[J]. 中国沙漠, 9(4): 30-39. [Yin Y S. 1989. Study on sand drift in strong wind region in Gravel Desert[J]. Journal of Desert Research, 9(4): 30-39.]
- 张广, 武俊琰, 惠彦君, 等. 2006. 浑善达克沙地公路综合防护技术及其效益分析[J]. 干旱区资源与环境, 20(5): 189-196. [Zhang G, Wu J Y, Hui Y J, et al. 2006. Benefit analysis and integrated preservation technology system of the shelter belt of highway in Otindag Sandy Land[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 20(5): 189-196.]
- 张华, 李锋瑞, 张铜会, 等. 2002. 科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构与变异特征[J]. 水土保持学报, 16(2): 20-23, 28. [Zhang H, Li F R, Zhang T H, et al. 2002. Wind-Sand flow structure and its variation under different surface conditions in Korqin sandy land[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 16(2): 20-23, 28.]
- 张克存, 屈建军, 沮瑞平, 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, 58. [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]. Research of Soil and Water Conservation, 12(1): 54-55, 58.]
- 张伟民, 汪万福, 张克存, 等. 2009. 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, 29(6): 1015-1020. [Zhang W M, Wang W F, Zhang K C, et al. 2009. Wind tunnel experiments on sand-laden wind structure and sand erosion-deposit budget over Gravel bed under abundant and deficient sand supplies[J]. Journal of Desert Research, 29(6): 1015-1020.]
- 张正偲, 董治宝. 2013. 腾格里沙漠东南部野外风沙流观测[J]. 中国沙漠, 33(4): 973-980. [Zhang Z C, Dong Z B. 2013. Field observation of Aeolian sediment flux in the southeast Tengger Desert[J]. Journal of Desert Research, 33(4): 973-980.]
- 邹学勇, 董光荣, 王周龙. 1995. 戈壁风沙流若干特征研究[J]. 中国沙漠, 15(4): 368-373. [Zou X Y, Dong G R, Wang Z L. 1995. A study on some characteristics of drifting sand flux over Gobi[J]. Journal of Desert Research, 15(4): 368-373.]
- Anderson R S, Haff P K. 1988. Simulation of eolian saltation[J]. Science, 241: 820-823.
- Baas A C W. 2008. Challenges in aeolian geomorphology: investigating Aeolian streamers[J]. Geomorphology, 93(1-2): 3-16.
- Baas A C W, Sherman D J. 2005. Formation and behavior of aeolian streamers[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface (2003-2012), 110(F3): F03011.
- Butterfield G R. 1999. Near-bed mass flux profiles in Aeolian sand transport: high-resolution measurements in a wind tunnel[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 24(5):

- 393-412.
- Dong Z B, Liu X P, Wang H T, et al. 2002. The flux profile of a blowing sand cloud: a wind tunnel investigation[J]. *Geomorphology*, 49(3-4): 219-230.
- Dong Z B, Qian G Q. 2007. Characterizing the height profile of the flux of wind-eroded sediment[J]. *Environmental Geology*, 51(5): 835-845.
- Dong Z B, Lv P, Zhang Z C, et al. 2014. Aeolian transport over a developing transverse dune[J]. *Journal of Arid Land*, 6(3): 243-254.
- Fryrear D W, Stout J E, Hagen L J, et al. 1991. Wind erosion: field measurement and analysis[J]. *Transactions of the ASAE*, 34(1): 155-160.
- Iversen J D, Rasmussen K R. 1994. The effect of surface slope on saltation threshold[J]. *Sedimentology*, 41(4): 721-728.
- Lancaster N, Baas A. 1998. Influence of vegetation cover on sand transport by wind: field studies at Owens Lake, California[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(1): 69-82.
- Ni J R, Li Z S, Mendoza C. 2003. Vertical profiles of aeolian sand mass flux[J]. *Geomorphology*, 49(3-4): 205-218.
- Rotnicka J. 2013. Aeolian vertical mass flux profiles above dry and moist sandy beach surfaces[J]. *Geomorphology*, 187: 27-37.
- Williams G. 1964. Some aspects of the eolian saltation load[J]. *Sedimentology*, 3(4): 257-287.
- Zheng X J, He L H, Wu J J. 2004. Vertical profiles of mass flux for windblown sand movement at steady state[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 109(B1): B01106.

## Variation of aeolian sediment flux profiles on a parabolic dune at the southern fringe of the Hobq Desert

TAO Binbin, LIU Dan, GUAN Chao, HASI Eerdun\*

(College of Resource Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** The airflow and sediment transport rate on the parabolic dune and the aeolian sediment flux profiles were examined in details in the southern Hobq desert in late April 2010 when the wind was strong and sediment movement was intense. The analyses show that 71%~91% sediments moved in the space between 0 and 0.10 m above surface. This confirms the results of previous research that blown sand activity occurs near bed. Due to the difference of wind velocity, underlying surface conditions, and slope profiles, sediment transport rate and relative sediment transport rate vary, so do the aeolian sediment flux profiles. At the measurement spots where wind velocity and sediment transport rate are small, such as the toe and the lower part of the windward slope, the aeolian sediment flux profiles vary considerably. Underlying surface condition is a vital factor influencing aeolian sediment flux profile. At the windward toe that suffers deflation, the gravelly surface is hard. This contributes to sediments' saltation, so sediment transport rate is relatively high at the upper layer of the aeolian sediment flux profile. Along the windward slope, sediments move upward and have a lower saltation height. Therefore sediment transport is relatively high near surface. In contrast, sediments move downward at brink-line on the leeward slope with higher height and the trajectories deform, so the saltation height is higher. Affected by the difference of windward slope profile shape, the aeolian sediment flux profiles at the crest vary markedly among the measurement spots. In spite of the variation of the aeolian sediment flux profiles, they can still be well described by the exponential decay law at the windward slope and crest. In the equation  $Q = a \exp(-z/b)$ , the coefficient  $a$  has an apparent power function correlation with sediment transport rate and increases simultaneously with wind velocity, but there is no clear correlation between them. The coefficient  $b$  has no significant correlation with these two factors. At the brink-line, the profiles were segmented at the 0.10 m height: the profiles of near surface follow exponential decay while the upper layers obey power function.

**Key words:** parabolic dune; aeolian sediment flux profile; function fitting; Hobq Desert