

# 海岸风沙流中不同粒径组沙粒的 垂向分布模式

董玉祥<sup>1</sup>, S. L. Namikas<sup>2</sup>, P. A. Hesp<sup>2</sup>

(1 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275;

2 Department of Geography and Anthropology, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, 70802, USA)

**摘要:** 通过对河北昌黎黄金海岸沙丘风沙流的野外实地观测与室内风洞模拟实验数据的数值模拟, 探讨了我国典型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。结果表明, 河北昌黎黄金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特征并不一致, 其中细沙和中沙符合典型的指数递减分布规律, 但粗沙则为负幂函数分布。究其原因, 主要与不同粒径组沙粒输沙量的分布高度及运动方式差异有关。在实际非均匀沙床面上, 粗沙主要集中分布于沙丘表面 4cm 高度内湍流发育的近地表层, 运动方式以蠕移为主, 沙丘表面湍流的主导作用使其输沙量随高度的变化满足负幂律关系, 但中沙和细沙则以跃移运动为主, 跃移沙粒输沙量的垂向分布呈现指数递减特征。

**关键词:** 海岸风沙流; 粒径; 输沙量; 垂向分布模式

文章编号: 1000-0585(2009)05-1179-09

## 1 引言

风沙流结构是风沙研究的基本问题之一, 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, 其中包括关于风速、输沙量、沙粒粒径和下垫面性质及形态等因素对风沙流结构影响的研究<sup>[1~11]</sup>。例如, 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<sup>[1]</sup>; 风速对风沙流结构的影响, 一般认为在总输沙量相同(或相近)的情况下, 随着风速的增大, 会使近床面气流中搬运的沙量占总输沙量的比例相对减少, 并相应地增加上层气流中搬运的沙量, 因为风速的增大增加了沙粒的搬运高度, 就会造成近床面气流搬运的沙量相对减少和上层气流输沙量的增加<sup>[1]</sup>。近期, 进一步对其中不同粒径沙粒输沙量的垂向分布有所关注<sup>[12~16]</sup>, 但研究结论却略有不同, 董治宝等的风洞实验结果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, 即符合典型的指数递减规律<sup>[12]</sup>; 邵亚平等对非均匀风沙跃移运动的数值模拟结果也是不同粒径沙粒具有类似的输沙量分布特征<sup>[13]</sup>; 冯大军等通过非均匀沙床面上的风洞实验<sup>[14]</sup>, 认为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, 而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; 董玉祥等则根据对海岸沙丘

收稿日期: 2009-02-14; 修订日期: 2009-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(40571019)。

作者简介: 董玉祥(1964), 男, 河南西平人, 博士, 教授。主要从事海岸风沙地貌和土地资源开发利用与保护研究。E-mail: eesdyx@mail.sysu.edu.cn

表面风沙流结构中不同粒径沙粒输沙量垂向分布的野外实地观测结果, 提出海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒的输沙量具有不同的垂向分布特征<sup>[15, 16]</sup>。本文拟多种研究方法相结合, 通过野外实地观测、室内风洞模拟实验与数值模拟的综合研究, 以我国典型海岸沙丘分布区域之一的河北昌黎黄金海岸为例, 研究我国典型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模式。

## 2 研究方法

### 2.1 野外实地观测

河北昌黎黄金海岸是我国海岸沙丘的典型分布区<sup>[17~22]</sup>, 平行于其海岸线分布有南北长约 45km、宽约 1.5~2km、高约 15~30m 的海岸沙丘带, 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, 其中尤以高大的横向沙脊最具典型性和代表性<sup>[23, 24]</sup>, 该区域的横向沙脊是进行海岸沙丘表面风沙流中不同粒径组沙粒输沙量垂向分布模式的野外实地观测和室内风洞模拟实验的理想研究对象。

野外实地观测点选择在位于高 39.5m、宽 143.8m 的横向沙脊顶部, 沙脊顶部大致浑圆, 实地观测时间为 2007 年 4 月 2~4 日。观测仪器是北京师范大学等研制的野外用梯度风速仪和平口式集沙仪。梯度风速仪的风速测量范围为 0.3~30.0m/s, 分辨率为 0.1m/s, 可自动采集和输出 1min 的滑动平均数据并可直接用 Excel 软件进行统计分析; 平口式集沙仪的总高度为 85cm, 沙尘采集高度 60cm, 采集梯度为 30 个连续的 2cm×2cm 进沙口, 采集效率大于 80%。野外实地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 380cm, 集沙仪取样时间间隔根据风速大小及集沙情况等各有不同。采集的集沙仪沙粒样品经简单处理后带回室内进行称重和粒度分析。

### 2.2 风洞模拟实验

风洞模拟实验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室的风沙环境工程实验室进行, 主要是测定在沙源充足时不同风速下不同高度的输沙量及其粒度构成。实验使用的仪器设备主要是风沙环境工程风洞、三维移测仪、风沙流风场数据采集系统、集沙仪、风速廓线仪和电子分析天平等。

实验步骤: 第一步, 将从河北昌黎黄金海岸沙丘采集的沙丘沙, 以风洞中线为中心平铺长 7.5m、宽 2m、厚 3cm 的沙床, 并在实验中根据需要及时补充沙; 第二步, 将集沙仪设置于风洞中线、沙床下风向距沙床后缘 47cm 处, 风速廓线仪设置于集沙仪迎风向向前方 155cm 并偏离风洞中线 10cm 处, 以避免仪器本身对集沙仪集沙效率的影响; 第三步, 分别以风洞中线 50cm 高度的风速值约 7m/s、8m/s、10m/s、11m/s 和 12m/s 吹蚀非均匀沙床面, 测定各个不同风速时的风速梯度, 分别按照不同时间利用集沙仪采集不同风速时不同高度的输沙沙样, 获取相应的不同高度的集沙样品; 第四步, 将集沙仪所采集的集沙样品, 利用 1/1000 的电子分析天平称重记录, 并保存好集沙样品以便后期进行粒度分析。

野外实地观测和室内风洞实验采集的所有集沙样品, 利用 Malvern MS2000 激光粒度仪进行粒度分析。结果表明 (表 1), 采集的集沙样品中粗沙、中沙与细沙所占比例在 99% 以上, 其中以中沙为主, 故仅分析风沙流中粗沙、中沙与细沙输沙量的垂向分布特征。但风洞模拟实验中, 在 26cm 高度以上由于集沙样品量太少难以进行粒度分析而缺乏有效数据, 且先前研究的风沙流高度一般仅 20cm, 为便于比较与分析, 故只对室内风洞实验的 26cm 以下高度内的 13 个层位的输沙量数据及其粒度等进行计算和分析。

表 1 风沙流沙物质的平均粒度构成 ( % )

Tab 1 Composition of sand grain size in the wind-sand flow

粒级 ( mm )		极粗沙	粗沙	中沙	细沙	极细沙	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
野外观测	观测 D	0 02	1. 63	58 55	39 51	0 13	0 16
	观测 E	0 00	0 33	54 64	44 79	0 04	0 19
	观测 F	0 00	0 07	51. 14	48 79	0 00	0 00
	平均值	0 01	0 68	54 78	44 36	0 06	0 12
风洞实验	7m/ s	0 00	0 81	59 94	39 24	0 00	0 00
	8m/ s	0 00	0 51	58 86	40 63	0 00	0 00
	10m/ s	0 00	0 56	58 00	41. 44	0 00	0 00
	11m/ s	0 00	0 81	59 36	39 83	0 00	0 00
	12m/ s	0 00	1. 08	64 42	34 50	0 00	0 00
	平均值	0 00	0 75	60 12	39 13	0 00	0 00

2 3 数据统计与模拟分析

通过上述野外实地观测和室内风洞模拟实验与粒度样品分析，可以获得每次观测与实验的风沙流中不同高度的输沙量及其粒度构成数据，由此可计算出每次观测与实验的风沙流的总输沙量、不同高度的输沙量以及不同粒径组沙粒的总输沙量和不同高度的输沙量，继而进行不同粒径组沙粒垂向分布模式的数值模拟。

3 结果与分析

3 1 野外实地观测结果

野外实地观测时观测点地表 60cm 高度的风速为 7. 9~ 10. 9m/ s，由于野外实地观测条件所限实际仅获得观测 D、观测 E 和观测 F 共 3 组有效观测数据，其中观测 D、观测 E 和观测 F 测得的总输沙量分别是 8 377、13 414 和 15. 697g/ ( cm<sup>2</sup> min)，平均为 12. 496g/ ( cm<sup>2</sup> min) ( 图 1)。为减少分析误差，采用这 3 组有效观测数据的平均值分析野外实地观测的风沙流中不同粒径组沙粒输沙量的垂向分布模式。

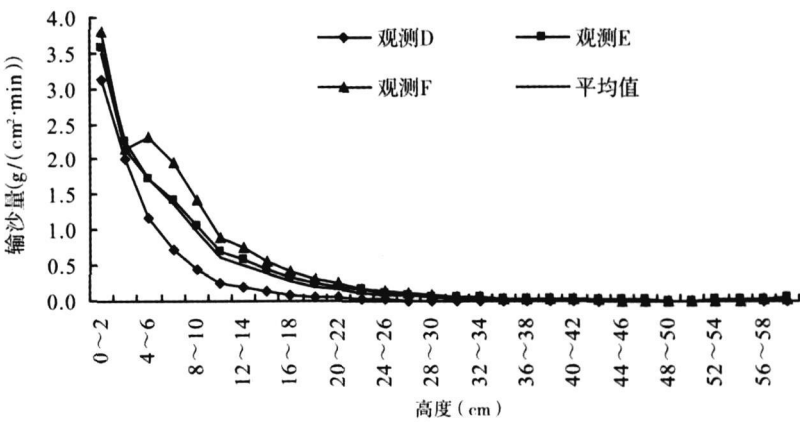


图 1 野外实地观测的风沙流中不同高度的输沙量

Fig 1 Field observation data of sand transport rate at different heights in mass flux

按照野外实地观测的平均值, 风沙流中粗沙、中沙与细沙的总输沙量平均分别为  $3.823 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ 、 $731.689 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$  和  $512.682 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$ , 共占风沙流总输沙量的 99.89%。根据粗、中、细沙在风沙流不同高度的输沙量(图2), 分别进行在不同高度各粒径组沙粒的输沙量与高度的数值拟合分析。结果表明(表2), 粗沙在风沙流中的

垂向分布模式在 0~60cm 高度内整体上呈现出幂函数分布, 尤其是在 0~20cm、0~40cm 高度内呈现为典型的幂函数分布, 其相关系数可达 0.97; 中沙和细沙在 0~60cm 高度内气流含沙量随高度分布完全遵循指数函数关系, 其输沙量随高度呈指数规律递减, 尤其是 0~20cm 高程范围内二者指数函数关系的相关系数达到 0.99 以上。

表 2 野外实地观测的不同粒径组沙粒输沙量与高度之间的拟合分析

Tab 2 The correlation analysis of sand transport rate and height of different grain size groups of field observation

粒径	高度(cm)	指数函数		幂函数	
		公式	相关系数( $R^2$ )	公式	相关系数( $R^2$ )
粗沙	0~20	$Q=2.8369e^{-0.772h}$	0.9644	$Q=5.1023h^{-3.1995}$	0.9711
	0~40	$Q=0.2616e^{-0.3228h}$	0.6866	$Q=2.7064h^{-2.7051}$	0.9098
	0~60	$Q=0.0393e^{-0.1086h}$	0.2219	$Q=0.596h^{-1.7685}$	0.5496
中沙	0~20	$Q=289.09e^{-0.3447h}$	0.9945	$Q=347.39h^{-1.3768}$	0.9300
	0~40	$Q=220.58e^{-0.2933h}$	0.9928	$Q=772.83h^{-2.0469}$	0.9129
	0~60	$Q=104.01e^{-0.2128h}$	0.8578	$Q=1022.7h^{-2.2441}$	0.8900
细沙	0~20	$Q=155.22e^{-0.2628h}$	0.9879	$Q=168.68h^{-1.0121}$	0.8587
	0~40	$Q=154.97e^{-0.2647h}$	0.9975	$Q=425.54h^{-1.7901}$	0.8611
	0~60	$Q=102.19e^{-0.2218h}$	0.9331	$Q=814.4h^{-2.2154}$	0.8689

3.2 室内风洞模拟实验结果

当实验风速从 7m/s 依次增加到 12m/s 时, 粗沙在 26cm 高度内的总输沙量由 7m/s 风速的  $3.184 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$  增大到 12m/s 的  $88.400 \times 10^{-2} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{min})$  (表3), 但主要集中在近地表 4cm 高度内, 一些较高高度的输沙量数据多为零, 样本数据的缺乏致使难以对每个风速下粗沙的输沙量与高度之间进行函数关系的定量拟合分析与比较, 仅求得风速为 11m/s 时粗沙输沙量与高度之间的拟合函数(图3)。但是, 对各种不同风速下粗沙不同高度的输沙量之间的相关分析结果(表4), 粗沙各风速的不同高度输沙量之间具有很好的相关关系, 相关系数在 0.98 以上, 表明不同风速下粗沙在风沙流中不同高

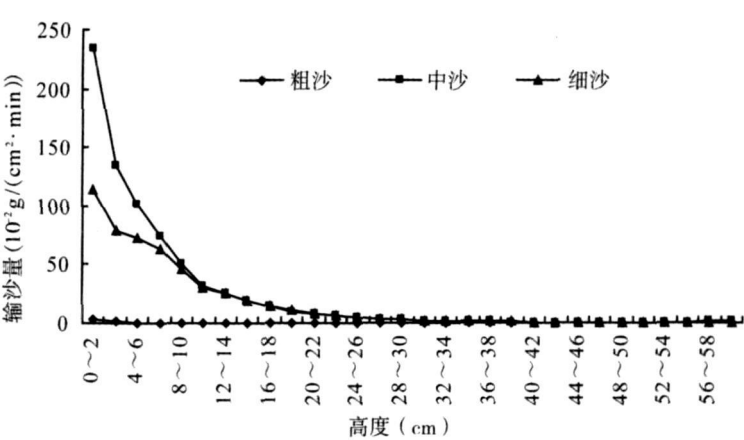


图 2 野外实地观测的风沙流中不同粒径组沙粒在不同高度的输沙量  
Fig 2 Field observation data of sand transport rate of different grain size groups at different heights in mass flux

度的分布模式具有同质性，故风速为 11m/s 时的输沙量与高度之间的拟合关系应基本可代表粗沙输沙量的垂向分布模式，即粗沙输沙量的垂向分布模式为典型的负幂函数分布，负幂函数拟合的相关系数可达 0.93，但指数函数相关系数仅 0.78。

表 3 不同风速下粗沙在不同高度的输沙量 ( × 10<sup>-2</sup>g/( cm<sup>2</sup> · min) )

Tab 3 Sand transport rate of coarse sands at different heights at different wind velocity

高度( cm )	7m/ s	8m/ s	10m/ s	11 m/ s	12m/ s
0~ 2	2. 078	6 463	20 167	32 117	70 300
2~ 4	0. 726	1 747	3 383	7 117	11 767
4~ 6	0. 205	0 566	1 167	2 800	4 400
6~ 8	0. 108	0 084	0 500	1 033	0 967
8~ 10	0. 031	0 034	0 075	0 117	0 433
10~ 12	0. 018	0 016	0 050	0 083	0 133
12~ 14	0. 009	0 009	0 025	0 033	0 067
14~ 16	0. 005	0 006	0 008	0 017	0 067
16~ 18	0. 003	0 003	0 008	0 033	0 133
18~ 20	0. 001	0 006	0 008	0 017	0 000
20~ 22	0. 000	0 003	0 008	0 017	0 033
22~ 24	0. 000	0 003	0 000	0 017	0 000
24~ 26	0. 000	0 000	0 000	0 033	0 100
合计	3. 184	8 940	25 399	43 434	88 400

表 4 不同风速下粗沙在不同高度的输沙量之间的相关系数

Tab 4 Coefficient ratio of sand transport rates of coarse sands at different heights at different wind velocity

风速 ( m/ s )	7	8	10	11	12
7	1. 000	0 997	0 984	0 992	0 984
8	0. 997	1. 000	0 994	0 999	0 995
10	0. 984	0 994	1. 000	0 998	1. 000
11	0. 992	0 999	0 998	1. 000	0 998
12	0. 984	0 995	1. 000	0 998	1. 000

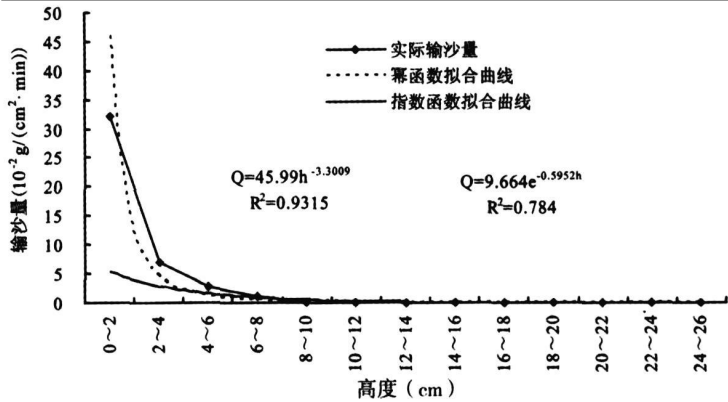


图 3 11m/s 风速时粗沙在不同高度的输沙量与高度之间的拟合关系

Fig 3 Coupling relation formulas between sand transport rate and height of coarse sands at 11m/s wind velocity

不同风速下中沙和细沙在不同高度的输沙量则具有相似的分布特征 (图 4), 其在不同高度的输沙量与高度之间的拟合关系呈现为典型的指数关系 (表 5), 相关系数大多在 0.99 以上, 最低也有 0.977, 中沙和细沙输沙量的垂向分布模式均符合指数递减规律。

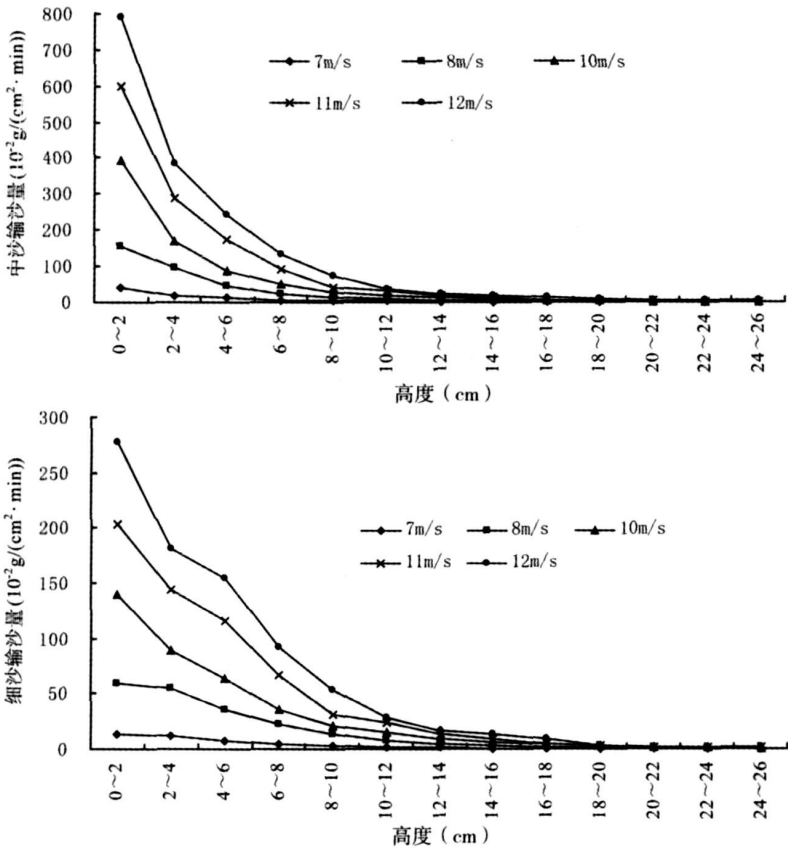


图 4 不同风速下中沙和细沙在不同高度的输沙量

Fig 4 Transport rate of medium sands and fine sands at different heights at different wind velocity

表 5 风洞实验中中沙与细沙输沙量与高度之间的拟合分析

Tab 5 The correlation analysis of sand transport rate and height of medium sands and fine sands from wind tunnel experiments

风速(m/ s)	细沙		中沙	
	拟合函数	相关系数( $R^2$ )	拟合函数	相关系数
7	$Q= 35\ 338e^{-0.5521h}$	0.995	$Q= 80\ 025e^{-0.6073h}$	0.993
8	$Q= 149\ 44e^{-0.5177h}$	0.994	$Q= 238\ 29e^{-0.5306h}$	0.998
10	$Q= 215\ 93e^{-0.4486h}$	0.998	$Q= 404\ 48e^{-0.4892h}$	0.989
11	$Q= 389\ 88e^{-0.4761h}$	0.996	$Q= 719\ 86e^{-0.5055h}$	0.991
12	$Q= 564\ 64e^{-0.493h}$	0.993	$Q= 830\ 57e^{-0.4557h}$	0.977

3.3 结果分析

依据上述结果, 海岸风沙流中粗沙输沙量的垂向分布模式应呈现为负幂函数分布, 中沙和细沙输沙量的垂向分布则完全符合指数递减规律, 此应与不同粒径组沙粒输沙量的分布高度及运动方式等的不同密切相关。

在风沙流中，沙粒粒径愈粗愈集中分布于风沙流的下层。野外观测数据显示（表 6），粗沙在风沙流中有 63.71% 集中在地表 2cm 高程内，总输沙量的 86.36% 又集中在 0~4cm 内的垂向范围内；中沙，0~4cm 内的输沙量占 50.35%，而 0~2cm 内的只有 31.91%；细沙，0~2cm 和 0~4cm 高度内的输沙量占总输沙量的比例只有 22.30% 和 37.67%。风洞模拟实验也有类似结果（图 5），按照不同风速的不同粒径组沙粒在不同高度的输沙量占 26cm 高度内总输沙量比例的平均值，在 0~2cm 高度内粗沙高达 74.09%，中沙有 46.34%，但细沙仅 32.51%，其中随风速的变化粗沙在 0~2cm 高度内输沙量所占比例还有所增大，最高比例达 79.53%。

表 6 风沙流中不同粒径在不同高度的输沙量比例（%）

Tab 6 Ratio of sand transport rate of different sand grain sizes at different heights in Aeolian mass flux

高度(cm)	粗沙	中沙	细沙
0~2	63.71	31.91	22.30
0~4	86.36	50.35	37.67
0~10	95.94	81.39	73.22
0~20	96.86	94.85	92.75
20~40	0.59	4.23	6.43
40~60	2.55	0.92	0.82

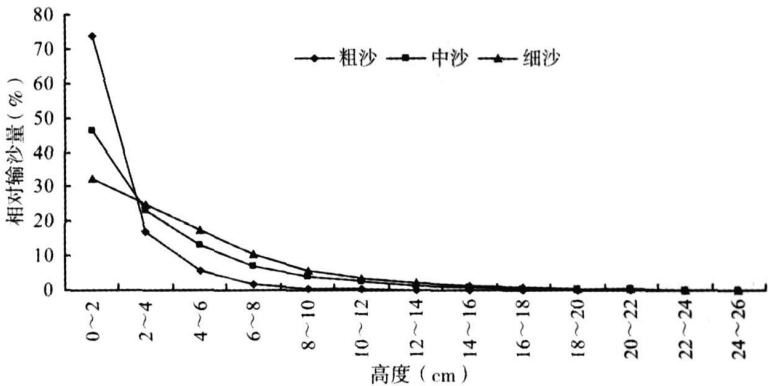


图 5 风洞内的不同风速下不同粒径组沙粒在不同高度的平均相对输沙量  
Fig. 5 Mean ratio of sand transport rate of different sand grain sizes at different heights of different wind velocity from wind tunnel experiments

因此，在海岸风沙流中，由于粗沙粒径较大，在一定风速范围内限于风的携沙能力，粗沙沙粒集中分布于非均匀沙床面的 0~2cm 高度内的近地表层，以蠕移为主要运动方式，而蠕移发生的近表层受沙丘表面微小形态影响湍流极为发育，湍流的主导作用使粗沙组沙粒输沙量随高度的分布变化满足负幂律关系<sup>[25]</sup>。但是，中沙沙粒和细沙沙粒尤其是细沙沙粒则相应分布在风沙流中比较高的高度范围内，其运动方式由于风速较高大多以跃移的形式运动，已有大量野外观测、风洞实验和数值模拟研究结果证实跃移沙粒的输沙量垂向分布是单一指数递减函数<sup>[1, 5, 7, 8, 11, 26]</sup>，即海岸风沙流中细沙和中沙输沙量的垂向分布符合典型的指数递减分布模式。

4 结论

（1）对我国海岸沙丘分布的典型区域——河北昌黎黄金海岸横向沙脊顶部风沙流的野外实地观测，以及利用该区海岸沙丘沙所做的风洞模拟实验的结果均表明，海岸风沙流中粗沙输沙量的垂向分布模式是负幂函数分布，中沙和细沙输沙量的垂向分布则完全符合指数递减规律，故风沙流中不同粒径组沙粒输沙量沿垂向的分布模式应非完全符合指数递

减规律<sup>[12~14]</sup>。究其原因,应与不同粒径组沙粒输沙量的分布高度及运动方式差异等有关。

(2) 限于野外观测条件没有能获得大样本的野外观测数据,对本研究有一定的影响。同时,今后还需要进一步探讨其他诸如风速、输沙量等因素对海岸风沙流中不同粒径组沙粒垂向分布模式的影响,并通过野外观测研究海岸沙丘不同部位的风沙流中不同粒径组沙粒垂向分布模式的变异等。

**致谢:** 本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,张春来、程宏、钱江、李志文、周娜、阎旭和夏显东参与了风洞实验,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] 吴正,等. 风沙地貌与治沙工程学. 北京: 科学出版社, 2003. 61~ 88
- [2] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes. London: Methuen & Co, 1941, 1~ 265
- [3] 邹学勇,董光荣. 风沙物理学的发展与展望. 地球科学进展, 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, 1998, 12(3): 89~ 97
- [5] Fryrear D W, Saleh A. Field wind erosion: Vertical distribution. Soil Science, 1993, 155: 294~ 300
- [6] Greeley R, Blumberg D G, Williams S H. Field measurements of the flux and speed of wind-blown sand. Sedimentology, 1996, 43: 41~ 52
- [7] Butterfield G R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport, high-resolution measurements in a wind tunnel. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24: 393~ 412
- [8] Ni J R, Li Z S, Mendoza C. Vertical profiles of aeolian sand mass flux. Geomorphology, 2002, 49: 205~ 218
- [9] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年(I). 中国沙漠, 2005, 25(3): 293~ 305
- [10] 董治宝,郑晓静. 中国风沙物理研究 50a(II). 中国沙漠, 2005, 25(6): 795~ 815
- [11] 李振山,张琦峰. 风沙流的输沙率沿程变化规律. 中国沙漠, 2006, 26(2): 199~ 193
- [12] Dong Z, Liu X, Wang H, *et al.* The flux profile of blowing sand cloud: A wind tunnel investigation. Geomorphology, 2002, 49: 219~ 230
- [13] Shao Y P, Mikami M. Heterogeneous saltation: Theory, observation and comparison. Boundary-Layer Meteorology, 2005, 115: 359~ 379
- [14] 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. 地理学报, 2007, 62(11): 1194~ 1203
- [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. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(5): 98~ 103
- [16] 董玉祥, Namikas S L, Hesp P A, 等. 海岸横向沙脊表面风沙流结构粒度响应的野外观测研究. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1022~ 1032
- [17] 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. 沉积学报, 1994, 12(1): 98~ 104
- [18] 吴正,黄山,胡守真,等. 华南海岸风沙地貌研究. 北京: 科学出版社, 1995. 25~ 52.
- [19] 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. 海洋与湖沼, 1997, 28(1): 56~ 65
- [20] 董玉祥. 中国海岸风沙地貌的类型及其分布规律. 海洋地质与第四纪地质, 2006, 26(4): 99~ 104
- [21] 董玉祥. 中国海岸风沙研究: 进展与展望. 地理科学进展, 2006, 25(2): 26~ 35
- [22] 胡镜荣,顾建清,等. 自然保护区可持续发展概论. 北京: 科学出版社, 1996. 55~ 81.
- [23] 董玉祥,马骏,黄德全. 河北昌黎黄金海岸横向沙脊表面的粒度分布模式. 地理研究, 2008, 27(4): 725~ 733
- [24] 董玉祥,马骏,黄德全. 人为干扰下海岸沙丘表面粒度分布变异实证研究. 中国沙漠, 2008, 28(2): 202~ 207
- [25] 李后强,艾南山. 风沙湍流的间歇性、稳定性及分形特征. 中国沙漠, 1993, 13(1): 11~ 20
- [26] 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. 科学通报, 2004, 49(11): 1099~ 1104



# Vertical distribution models of sand transport rate of different grain size groups in coastal aeolian mass flux

DONG Yuxiang<sup>1</sup>, S. L. NAMIKAS<sup>2</sup>, P. A. HESP<sup>2</sup>

(1 School of Geography and Planning, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China;

2 Department of Geography and Anthropology, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70802, USA)

**Abstract:** The vertical distribution model of transport rate of sands in different grain size groups in aeolian mass flux is one of the hot topics on the structure of aeolian mass flux. Some researches have been carried out by use of wind tunnel experiments or mathematical modeling, but the results are different. We believe that the combined methods should be used which include the field observation and wind tunnel experiment as well as mathematical modeling. Changli Gold Coast in Hebei Province is one of the most typical coastal aeolian dune distribution regions in China. It is very famous for the tall and typical coastal transverse ridges in Changli Gold Coast. One of the typical coastal transverse ridges in Changli Gold Coast was chosen to be measured to build the vertical distribution model of sands in different grain size groups in coastal aeolian mass flux by using the combined methods. On the basis of data from field observation and wind tunnel experiment, the vertical distribution model of sand transport rate in different grain size groups in aeolian mass flux, which is the correlation between sand transport rates of different heights with heights in aeolian mass flux, could be obtained by use of mathematical modeling. The results show that the vertical distribution models of sand transport rate in different grain size groups in aeolian mass flux are different. The vertical distribution of coarse sands could be expressed by typical power function, but the vertical distribution of the sand transport rate of medium sands and fine sands could be typically expressed by an exponential function, and the exponential function distribution is their vertical distribution model. Reasons for the difference of vertical distribution models of sands in different grain size groups in aeolian mass flux are the height of distribution of sands of different grain size groups and their movement ways in aeolian mass flux. For coarse sand particles, they are mainly distributed in the scope of 4cm height over dune. Normally turbulent flow plays a leading role in the movement of sands at the low height over dune. The influence of turbulent flow in near-surface layer makes most of the coarse sand particles to move as the way of surface creep and the distribution model of sand transport rate of coarse particles with height to satisfy the negative power relation. But the fine sands and medium sands, they mostly move in the way of saltation. A large number of field observation and wind tunnel experiments as well as numerical simulation research results demonstrate that the vertical distribution of sand transport rate of saltation particles is exponential decrease function.

**Key words:** coastal aeolian mass flux; grain size; sand transport rate; vertical distribution mode