

库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风沙运动特征

杨转玲^{1,2}, 钱广强¹, 董治宝¹, 罗万银¹, 张正偲¹,
逯军峰¹, 李继彦¹

(1. 中国科学院西北生态环境资源研究院 沙漠与沙漠化重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 风沙地貌发育受控于近地表风沙运动, 目前这一领域的研究较多关注短时期内(几分钟至几小时)、单一方向(正对主风向)的风沙流结构特征, 结果难以与长期的地貌过程联系起来。为此, 我们采用八方位四层梯度集沙仪, 于2014年5月至2015年5月, 在库姆塔格沙漠北部三垄沙地区进行了一个完整年度的风沙运动观测。经过6个时段连续观测, 获取了不同方向、不同高度的192个运动沙粒样品。结果表明: (1) 近地表1 m高度内, 收集的样品总质量为405.2 kg, 其中约75.3%集中在近地表0~0.2 m, 反映了近地表输沙特征。(2) 平均输沙率为 $55.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 风沙运动的风向以北风、东北风和西北风为主; 不同季节差异明显, 春季输沙率最大, 是年均输沙率的2.5倍, 夏季次之, 冬季最小。(3) 年度平均输沙通量廓线(风沙流结构)呈指数函数递减趋势, 部分通量廓线出现了戈壁风沙流的“象鼻效应”。(4) 平均净输沙率 $1.159 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 随高度增加呈递减趋势, 合成输沙方向为 193.2° ; 不同时段净输沙率随高度的变化基本与全年一致, 合成输沙方向随高度增加有从东北向北偏的趋势。综上所述, 该区域输沙强度以春季最为强烈, 输沙方向以N、NE和NW方向为主, 且春、夏两季节分别有一个次输沙方向, 为S方向。本研究对于深入理解三垄沙地区风沙运动特征和揭示库姆塔格沙漠沙物质来源有重要意义。

关键词: 库姆塔格沙漠; 三垄沙; 风沙流; 风沙流结构; 输沙率

文章编号: 1000-694X(2018)01-0058-10

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2016.00132

中图分类号: P931.3

文献标志码: A

0 引言

风沙流是风与其所携带的沙物质组成的气-固两相流, 它的形成依赖于空气与沙质地表两种不同密度物理介质的相互作用, 是风沙物理的核心内容, 也是风沙地貌、沙漠化、防沙治沙工程的基础理论之一^[1-4]。对风沙流的系统研究始于20世纪30年代, 自Bagnold^[5]对北非沙漠风沙流通量进行观测和实验以来的70余年中, 国内外学者对风沙流的野外观测和室内模拟已取得大量研究成果。Bagnold^[5]经过多次利比亚荒漠考察和一系列风洞实验, 结合当时流体力学研究成果, 形成了一套风沙物理学理论, 出版了第一部风沙物理学著作《风沙物理与荒漠沙丘物理学》, 至今仍被视为风沙运动研究的经典著作。Chepil等^[6-8]对土壤风蚀做了系统研究, 建立了风蚀方程, 不仅增强了对风沙流的理解, 丰富了风沙流理论, 同时为风沙应用研究树立了典范。兹纳门斯基^[9]研究了各种粗糙表面的风沙流侵蚀规律, 阐明了风沙两种物质相互作用的物理机制。

中国自1967年建立国内第一个风沙环境风洞实验室以来, 全面开展了风沙运动的野外观测和实验研究。很多学者对沙漠、戈壁、海岸等不同下垫面的风沙流通量进行了实地观测和室内风洞实验, 取得了重要的研究成果。哈斯^[10]对腾格里沙漠东南缘沙丘的观测结果表明, 沙丘表面不同部位输沙量垂线分布有明显差异。冯大军等^[11]对风沙流中不同粒径组沙粒输沙量垂向分布的研究结果表明, 在非均匀风沙流中, 粗粒径组沙粒垂向输沙量上部符合指数函数分布但近床面区偏离指数函数分布。张克存等^[12-13]、屈建军等^[14]通过野外观测和风洞模拟实验表明, 戈壁风地表风沙活动集中在距地表0.2 m高度范围内, 且不管风速多大, 风沙流都处于未饱和的非堆积搬运状态; 而戈壁风沙流垂向分布特征与沙漠风沙流完全不同, 出现了所谓的“象鼻效应”。韩致文等^[15]通过实测塔克拉玛干沙漠腹地典型新月形沙丘表面的输沙量, 发现迎风坡脚输沙量垂向分布规律不完全符合指数函数, 出现了与戈壁风沙流结构特征相似的“象鼻效应”。董玉祥等^[16]

收稿日期: 2016-09-13; 改回日期: 2016-09-24

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(41271022, 41671009)

作者简介: 杨转玲(1990—), 女, 甘肃通渭人, 博士研究生, 主要从事风沙地貌研究。E-mail: yangzhuanling@lzb.ac.cn

对海岸沙丘表面风沙流结构的粒度响应进行野外实地观测结果表明,海岸沙丘表面风力分选作用明显,风沙流所含中和细沙组分比例增多、粗沙组分比例降低;而随高度增加各高度层均表现为以中沙为主,中沙含量呈先减小后增加趋势。

前人对风沙流进行研究时,由于技术条件等方面的限制,时间序列较短,难以说明区域长时期真实的输沙特征。同时,风沙流输沙的方位分布也是风沙流研究的重要内容之一,但是在野外实际环境中,由于风速、风向及地形和下垫面等因素影响,对野外实际观测风沙流输沙的方位分布造成了很大困难。八方向分层集沙仪能够很好地解决这一难题,为定量研究风沙流输沙的方位特征提供参考。本文以库姆塔格沙漠北部三垄沙地区为研究区域,以 2014 年 5 月至 2015 年 5 月一个完整年度的野外实测数据为基础,分析了不同方向和高度的风沙流输沙特征,探讨了该区域风沙流输沙方向和风沙流结构特征,为风沙流观测和研究及进一步了解该地区及整个库姆塔格沙漠的风沙运动特征及风沙地貌形态变化规律提供理论依据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

库姆塔格沙漠位于塔里木盆地东部(39°08'—

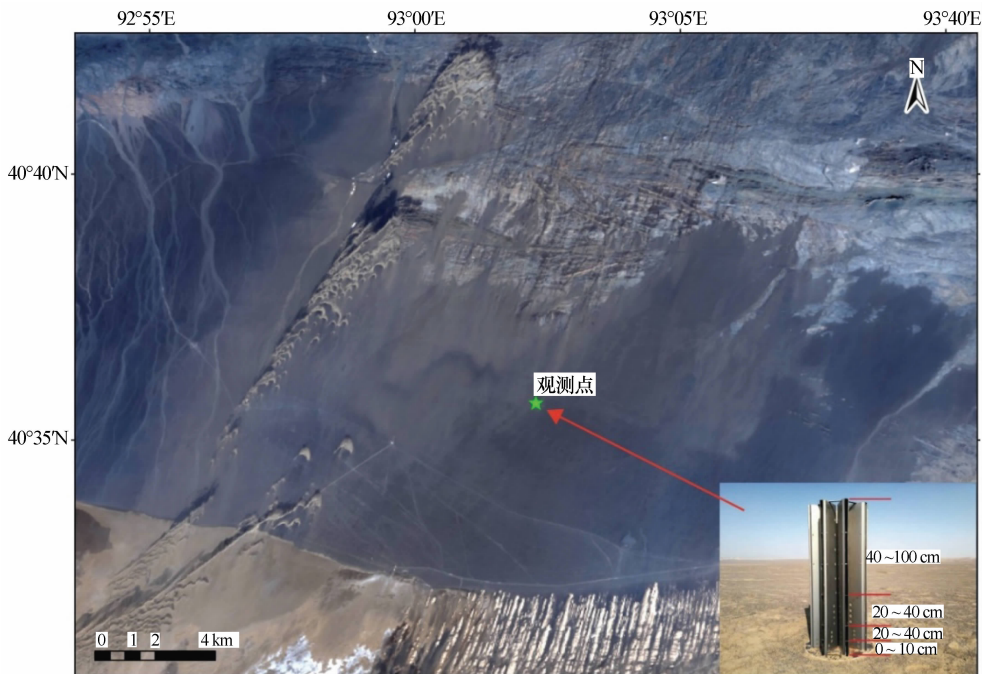


图 1 三垄沙野外观测点位置

Fig. 1 Location of the observation point in Sanlongsha Area

41°00'N,89°58'—94°54'E),东西跨度 280 km,南北宽约 120 km,总面积约 $2.29 \times 10^4 \text{ km}^2$,是中国的第六大沙漠^[17-18]。该沙漠处于封闭的塔里木盆地以东及亚欧大陆腹地,属极端干旱大陆性气候,年降水量在 10 mm 以下,气候极其干燥,地表植被稀疏,沙丘几乎全部是流动沙丘^[18]。主导风向为东北风,其次是西北风,8 级以上大风天数在 100 d 以上,多沙尘和浮尘天气^[19]。库姆塔格沙漠风沙地貌类型复杂多样,沙丘类型齐全,是研究风沙地貌、风沙活动以及沙漠形成演化的天然实验室。

研究区位于库姆塔格沙漠北部三垄沙地区(40°35'N,93°02'E),观测点四周地表为相对平坦的裸露沙地(图 1)。三垄沙是一条位于库姆塔格沙漠东北部的流动沙丘带(40°27'32"—40°59'27"N,92°57'06"—93°09'16"E),呈 NE-SW 向分布,长约 20 km,宽约 2.4 km,面积约 47.18 km^2 ^[20-21]。根据三垄沙地表沉积物粒度分析结果,该区主要风沙地貌类型有新月形沙丘和沙丘链、线形沙丘、爬坡沙丘、风成沙砾浪及剥蚀残丘;地表沙物质以中沙和细沙为主,二者平均含量之和为 63.20%;流动沙丘以单个新月形沙丘和新月形沙丘链为主,移动较快,在主导风向东北风作用下由东北向西南移动。

1.2 研究方法

由于传统单方向集沙仪不适于长期全方位连续

观测,其结果难以与长期的地貌过程联系起来,因此采用八方位四层梯度集沙仪(图2),该集沙仪可以同时观测不同方向、不同高度的输沙通量空间分布特征,集沙筒自正北顺时针方向旋转,每隔45°有一个集沙筒(共8个方位有集沙筒)。集沙仪高1 m,4个高度分别距地面0.1、0.2、0.4、1 m,共计32个进沙通道,每层进沙口面积分别为0.02 m(宽)×0.1 m(高)、0.02 m(宽)×0.1 m(高)、0.02 m(宽)×0.2 m(高)、0.02 m(宽)×0.6 m(高)。于2014年5月17日至2015年5月19日在选定地点(4 km范围内无流动沙丘,避免近源风沙影响)进行了风沙运动规律的连续观测,根据风力强度确定观测时长,在一个完整年度内共获取6个时段的风沙流观测数据(表1)。

所集沙粒用精度0.01 g的电子秤称重,获得输沙量数据。根据野外观测结果,采用以下公式计算单位时间单位宽度的输沙率(即单宽输沙率 Q):

$$Q = \frac{W}{L \cdot \Delta T} \quad (1)$$

式中: Q 为输沙率($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$); W 为集沙量(kg); L 为集沙仪进沙口宽度(m); ΔT 为时间(d)。

采用如下公式计算不同高度范围内的输沙通量($q(h)$):

$$q(h) = \frac{W}{S \cdot \Delta T} \quad (2)$$

式中: $q(h)$ 为输沙通量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); W 为集沙量(kg); S 为集沙仪进沙口面积(m^2); ΔT 为时间(d)。以集沙口的平均高度代表观测高度。

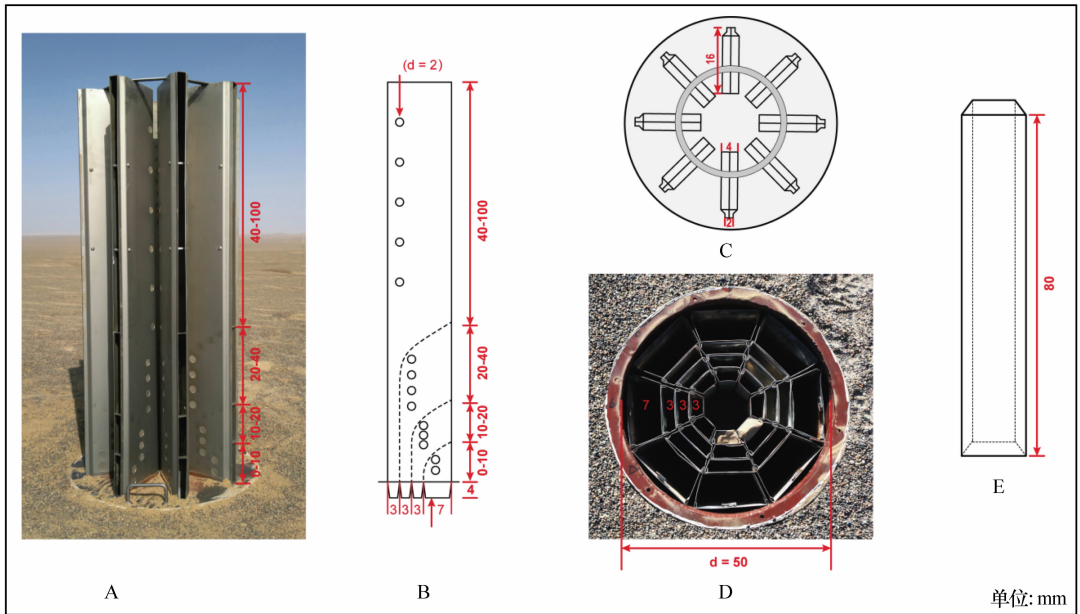


图2 八方位四层梯度集沙仪

Fig. 2 Eight-directional four layer gradient sand trap

表1 不同观测时段序列

Table 1 Sequence of different observation periods

观测时段	观测时间
1	2014年5月17日至2014年8月15日
2	2014年8月15日至2014年10月6日
3	2014年10月6日至2014年12月25日
4	2014年12月25日至2015年2月17日
5	2015年2月17日至2015年4月1日
6	2015年4月1日至2015年5月19日
全年	2014年5月17日至2015年5月19日

2 结果与分析

2.1 输沙总量

该区域地表1 m高度内全年输沙总量为405.2 kg。其中,4—8月获得了最大输沙量,占全年输沙总量的72.4%,其他月份输沙量相对较小,说明春、夏季的风沙活动最强烈(图3A)。该区全年输沙量随高度增加依次呈递减趋势,且70%以上的沙粒集中在距地表0.2 m的高度范围内。就不同观测时段而言,第1、3、6次的观测结果与全年一致;第2、5两次的输沙量随高度没有呈明显递减趋势,但沙粒

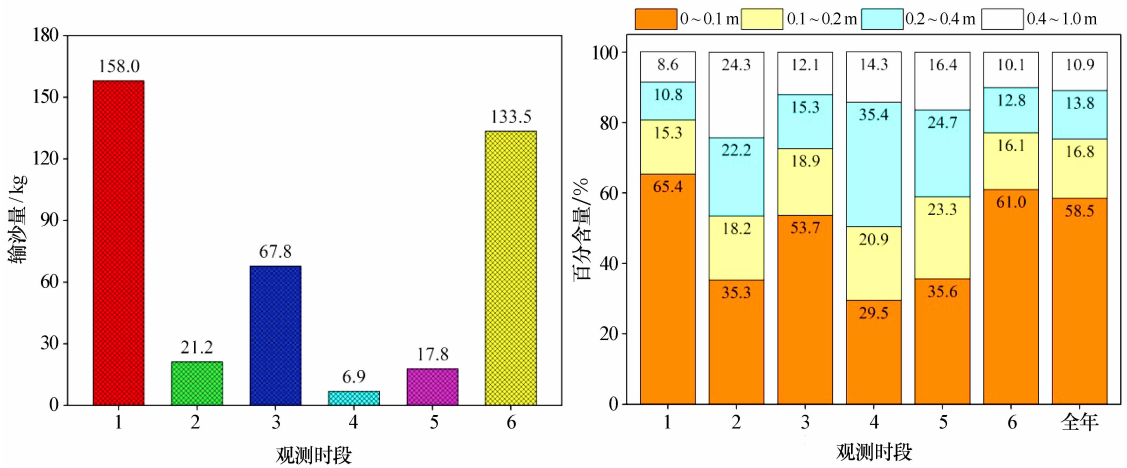


图 3 不同观测时段及不同高度层输沙总量

Fig. 3 Total sediment transport in different observation periods and different height layers

含量依然在近地表最大；而在第 4 次观测结果中，输沙量随高度增加没有呈现出递减的规律，相反在 0.2~0.4 m 高度输沙量最大(图 3B)。从整体上看，三垄沙地区输沙量随高度的分布特征与朱震达等^[22]、屈建军^[14]和张克存等^[12-13]的研究结果一致，风力对沙物质的搬运主要集中分布在距地表 0.2 m 范围内；而第 4 次观测结果的不同也说明了三垄沙地区独特的地面特征，在坚硬地面条件和强风的共同作用下，沙粒跃移高度可以达到较高的范围。

该地年风沙运动的风向以北风、东北风和西北风为主，其中，N、NE、NW 方向的输沙量最大，占总输沙量的 51%；其次为 E 方向，此外，还有一个次输沙方向，为 S 方向。从观测时段所在季节输沙方向看，春、秋两个季节主要输沙方向为 N、NE 和 NW，夏季各方位输沙量相当，冬季输沙方向与其他季节差异较大，主要的输沙方向为 E 和 NE 方向；且春、夏两季节分别有一个次输沙方向，为 S 方向(图 4)。

2.2 输沙率

三垄沙地区年平均输沙率为 $55.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，自北向西方向呈递减趋势，其中，N、NE 和 NW 方向的输沙率最大，占总输沙率的 51%；其次为 E、S 方向，其他方向较小(图 5A)。从不同观测时段所在季节来看，春季(第 6 次)输沙率最大，为 $139.0 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，是平均输沙率的 2.5 倍；夏季(第 1 次)次之，为 $87.8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，是平均输沙率的 1.6 倍；冬季(第 4 次)最小，是平均输沙率的 0.1 倍。此外，不同时段各方向的输沙率差异明显，其中，第 1 次和第 6 次观测结果较为一致，E 方向为

最大输沙率，其次为 N、NE 和 NW，再次为 S 方向；第 2、4、5 次观测结果基本一致，N、NE 和 NW 方向的输沙率较大，其他方向较小；第 3 次观测结果与其他时段不同，输沙率自北向西方向递减，且 S 方向的输沙率较大(图 5B)，这种差异可能与不同方向所获得沙源不同有关。虽然不同时段各方向输沙率差异明显，但也存在一个共同特征，即每个时段主要的物质来源方向均为 N、NE 和 NE，说明风沙运动的风向以北风、东北风和西北风为主。

2.3 风沙流结构

风沙流结构是风沙流研究的重要内容，指气流中单位面积、单位时间输沙量随高度的分布及变化规律^[23]。风沙流通量表征空气中沙粒随高度的变化特征，在风沙科学中占据重要位置，是风沙理论和防沙工程实践的重要内容^[24]；同时，风沙流中输沙通量的垂向分布是沙粒微观运动的宏观表现^[11]，对于正确估算输沙率、验证已有的数值模型具有重要意义^[25]。

根据野外风沙流观测结果，选取 Dong 等^[26]提出的指数函数模型进行风沙流结构的函数拟合，这个模型可以较好地模拟近地层 1 m 高度以内的风沙流结构。计算公式如下：

$$q(z) = ae^{-z/b} \quad (3)$$

式中： $q(z)$ 为 z 高度的输沙通量($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)； z 为高度； a 和 b 为拟合参数。

全年输沙通量随高度呈指数函数递减的趋势，相关系数 R^2 在 0.9 以上，相关性极显著；各方向风沙流结构与全年总体特征一致(图 6)；这一特征与前人对不同下垫面风沙流结构的研究结果一致，风

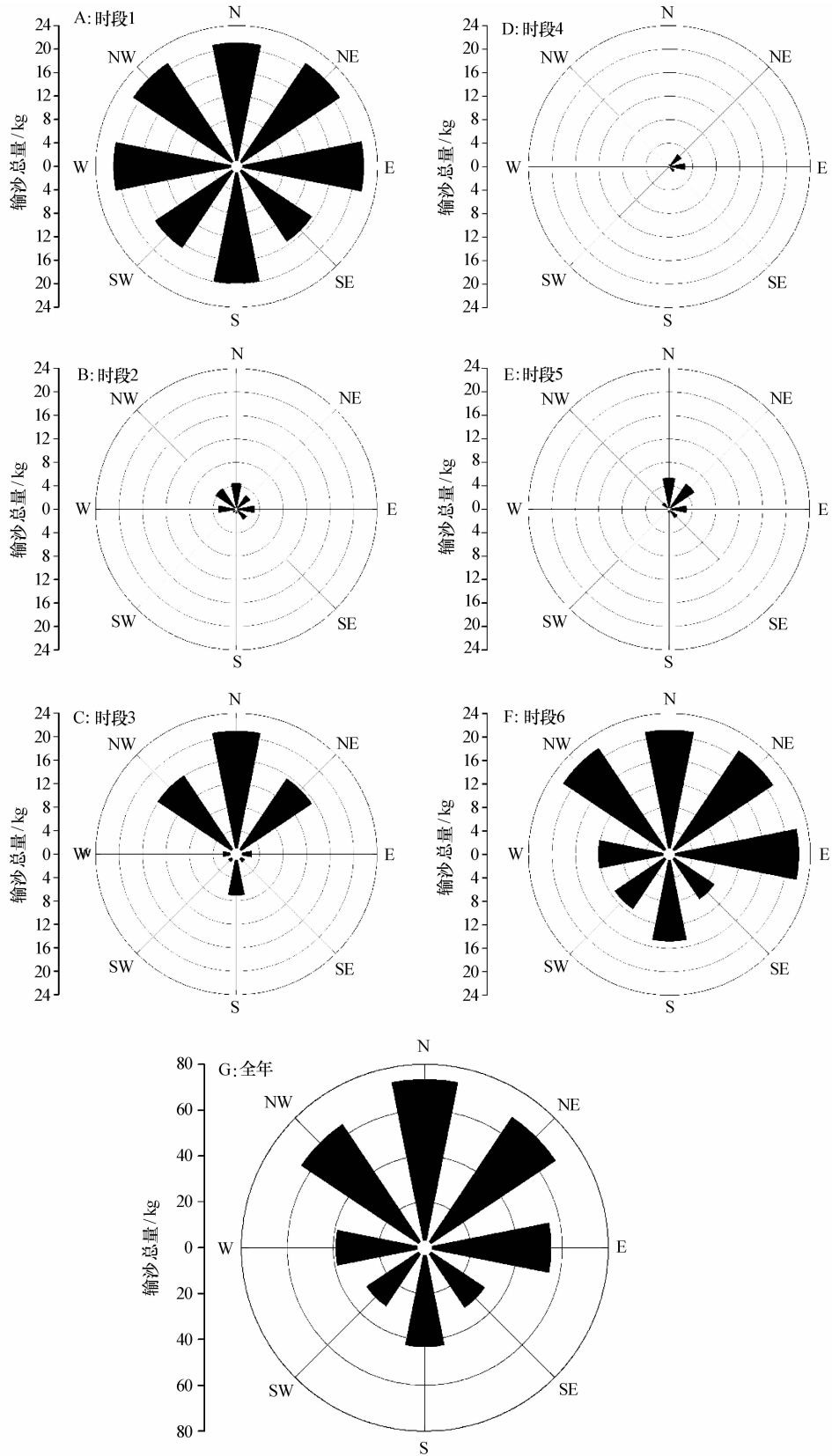


图 4 全年及不同观测时段各方向输沙总量

Fig. 4 Total sediment transport in different directions of the whole year and different observation periods

沙流中的含沙量随高度的增加大致呈指数规律递减^[27-29]。

从不同时段各方向风沙流结构拟合结果来看,除了第 2、3、6 次 W 方向和第 4 次 NE 方向外,其他

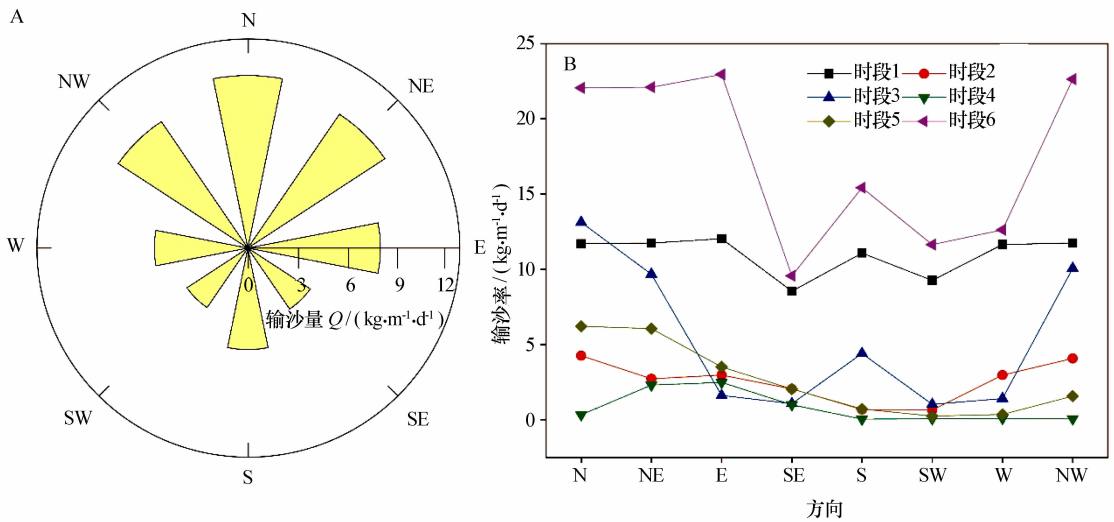


图 5 全年及不同时段各方向输沙率

Fig. 5 Sediment transport rate in each direction of the whole year and different observation periods

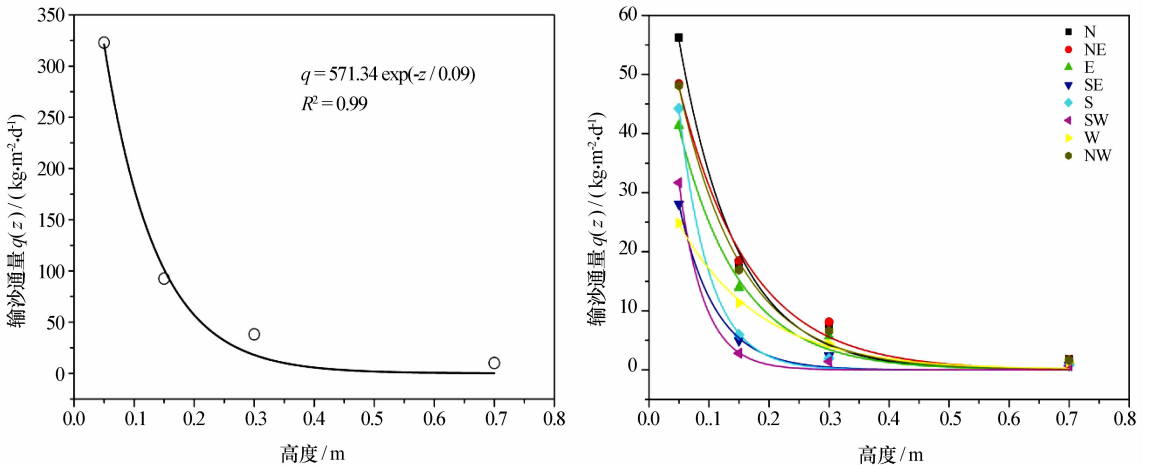


图 6 风沙流结构及其拟合方程

Fig. 6 Wind-sand flow structure and its fitting equation

历次各方向的结果与全年总体特征一致，拟合系数 R^2 均在 0.9 以上(表 2)。第 2、3、6 次 W 方向风沙流输沙通量随高度呈现增加后减小的趋势，最大值出现在距离地表 0.1~0.2 m 高度，风沙流结构出现了类似戈壁表面的“象鼻效应”，与张克存等^[12]对戈壁风沙流结构的研究结果相似。第 4 次 NE 方向风沙流输沙通量随高度增加呈减小—增加—减小的趋势，最大值出现在 0.2~0.4 m 高度，这种现象与风速和下垫面性质有密切关系，一般而言，风沙流的浓度随高度增加而减小，但在 NE 方向强风作用下风沙流的浓度增大，加上相对坚硬的地面，沙粒含量和沙粒跃移高度的最大值均出现在距离地表较高的位置。

2.4 合成输沙特征

风沙地貌是风和沙相互作用的产物，风力作用

是风沙地貌形成与演变动力条件，沙粒是其形成与发育的物质基础，二者缺一不可。为了进一步说明区域风沙地貌发育、沙物质来源和输送方向以及沙丘的走向和运动方向，有必要将输沙率和输沙方向结合起来，对合成输沙特征进行深入分析。通过矢量合成的方法计算得到净输沙率(Net Flux, NF)和合成输沙方向(Resultant Drift Direction, RDD)，分别以 EW 方向为 x 轴，以 NS 方向为 y 轴，NE 为正方向，SW 为负方向。计算公式如下：

$$\begin{aligned}
 Q_x &= Q_E + Q_{SE} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - Q_{SW} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - \\
 &Q_W - Q_{NW} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + Q_{NE} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (4) \\
 Q_y &= Q_N + Q_{NE} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) - Q_{SE} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) -
 \end{aligned}$$

表 2 不同时段各方向风沙流结构拟合结果

Table 2 Fitting results of wind-sand flow structure in each direction of different observation periods

观测时段	方向	拟合系数		R^2	观测时段	方向	拟合系数		R^2
		a	b				a	b	
1	N	131.71	0.08	0.987	4	N	2.20	0.12	0.942
	NE	126.10	0.09	0.989		NE	14.07	1.41	0.447
	E	135.53	0.08	0.989		E	11.51	0.23	0.978
	SE	213.83	0.04	0.998		SE	2.75	0.44	0.945
	S	136.42	0.08	0.997		S	0.69	0.06	0.989
	SW	212.89	0.05	0.995		SW	0.98	0.06	0.985
	W	131.52	0.08	0.993		W	1.17	0.07	0.987
	NW	133.73	0.08	0.993		NW	1.25	0.05	0.998
2	N	15.95	0.29	0.997	5	N	26.78	0.25	0.999
	NE	13.34	0.17	0.900		NE	27.12	0.24	0.995
	E	15.39	0.19	0.990		E	13.40	0.30	0.989
	SE	9.84	0.19	0.966		SE	9.06	0.24	0.988
	S	6.64	0.07	0.927		S	4.88	0.12	0.925
	SW	11.06	0.05	0.982		SW	4.94	0.05	0.993
	W	9.00	0.21	0.557		W	5.21	0.06	0.971
	NW	15.57	0.26	0.984		NW	5.25	0.31	0.927
3	N	135.63	0.09	0.988	6	N	226.41	0.09	0.989
	NE	56.92	0.17	0.997		NE	226.02	0.09	0.992
	E	4.85	0.36	0.984		E	238.17	0.09	0.991
	SE	31.72	0.04	0.995		SE	104.00	0.08	0.968
	S	276.72	0.03	0.999		S	623.92	0.03	0.998
	SW	22.30	0.04	0.987		SW	366.89	0.04	0.996
	W	4.07	0.42	0.723		W	128.59	1.22	0.851
	NW	62.71	0.16	0.997		NW	239.74	0.09	0.989

$$Q_S - Q_{SW} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) + Q_{NW} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \quad (5)$$

$$NF = \sqrt{Q_x^2 + Q_y^2} \quad (6)$$

$$RDD = 180^\circ + \arctan\left(\frac{Q_r}{Q_y}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (7)$$

三垄沙地区平均净输沙率 $1.159 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 合成输沙方向呈 SSW 方向, 净输沙率随高度增加呈递减趋势, 合成输沙方向随高度增加有从东北向北偏的趋势; 从不同时段看, 净输沙率随高度增加依次递减, 输沙方向有明显的变化规律, 冬季为东北偏东方向, 之后有逐渐向北偏的趋势, 春季呈 NE 方向, 夏季基本呈 N 方向, 并有北偏西的趋势, 到了秋季又向北偏, 基本呈 N 方向(图 7)。所以, 该地输沙方向以 N、NE 和 NW 方向为主, 与沙丘移走向和运动方向基本一致。

3 讨论

风蚀、搬运和堆积是 3 种基本的地貌过程, 在风沙流输运过程中, 近地表层气流中沙粒分布性质决定着沙粒风蚀和堆积过程发生, 因特征值易于通过观测、计算获得, 而被广泛应用^[30]。当特征值大于 1 时, 风沙流属于未饱和状态, 气流具有较大的搬运能力, 在沙源充分时有利于吹蚀, 而对于无充分沙源的戈壁地面乃是形成非堆积搬运条件的重要标志^[13]。三垄沙地区发育有大片地表粗疏的戈壁滩, 显然, 风沙流结构特征值远大于 1, 不论风速多大, 风沙流都处于未饱和搬运状态; 相对于沙漠, 地表更为坚硬, 因而在较强风力作用下, 运动沙粒的跃移长度和高度都会变大。因此, 该地 0~0.1 m 高度内输沙量占观测高度内总输沙量的 58.5%, 而 0.1~0.2、0.2

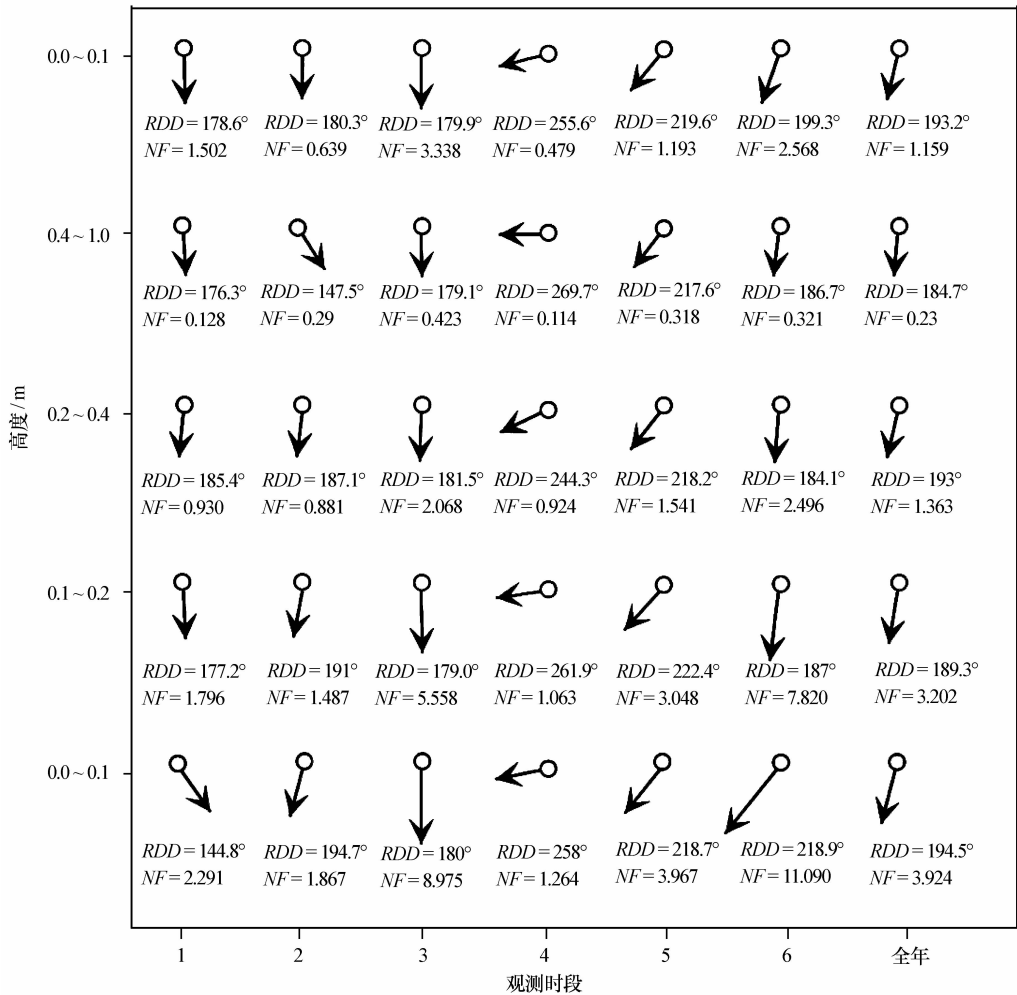


图 7 全年及不同时段净输沙率 $NF(kg \cdot m^{-1} \cdot d^{-1})$ 和输沙方向 RDD

Fig. 7 Resultant drift of the whole year and different observation periods

~0.4、0.4~1.0m 高度层分别为 16.8%、13.8%、10.9%，差异并不显著，说明相对坚硬的戈壁表面风沙流结构与前人在细沙表面的研究结果有很大差异^[31]。

风沙流输沙方向也是风沙流研究的重要内容之一。三垄沙地区主要的输沙风向为 N、NE 和 NW 方向，且有一个次输沙方向，为 S 方向；合成输沙方向随高度增加有从东北向北偏的趋势，整个高度的合成输沙方向呈 NNE 方向。库姆塔格沙漠北部风向以东北偏北风和西南风为主，这两组风向占全年风向的 73.75%~76.14%，其中东北偏北风占 45.14%~50.47%，西南风占 25.68%~28.61%^[32]。由此可知，三垄沙地区和库姆塔格沙漠的风向基本一致。三垄沙地区是一条呈 NE—SW 走向的流动沙丘带，沙丘移动自东北向西南方向移动；该地区的沙丘主要发育在北山山前的冲洪积戈壁，北部的沙丘甚至直接覆盖在山前剥蚀残丘

之上，冲洪积物和剥蚀产物可为该地区的风沙地貌发育提供沙源。基于三垄沙地区的沙源供应条件和主导风向，可以推测该地区的风沙运动和风沙地貌演化过程与库姆塔格沙漠主体之间存在密切联系。本研究能够从输沙特征方面说明三垄沙为库姆塔格沙漠的物质来源之一，但要证明这点，还需结合三垄沙地区的风况资料进行深入探讨。

4 结论

三垄沙地区地表 1 m 高度内全年总的输沙量为 405.2kg，其中 75.3% 的沙粒集中在近地表 0~0.2 m 范围内，反映了近地表输沙特征。年度风沙运动的风向以 N、NE 和 NW 方向为主，且春、夏两季节分别有一个次输沙方向，为 S 方向。从不时段看，4—8 月期间的输沙量占全年输沙总量的 72.4%，春、夏季的风沙活动最强烈。

三垄沙地区平均输沙率为 $55.2 kg \cdot m^{-1} \cdot$

d^{-1} ,自北向东西方向呈递减趋势,其中,N、NE和NW方向的输沙率最大,占总输沙率的51%;不同季节差异明显,春季输沙率最大,是平均输沙率的2.5倍,夏季次之,冬季最小。年均净输沙率 $1.159 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$,合成输沙方向呈SSW方向,净输沙率随高度增加呈递减趋势,合成输沙方向随高度增加有从东北向北偏的趋势。

三垄沙地区年度平均输沙通量廓线(风沙流结构)呈指数函数递减趋势,相关系数 R^2 在0.9以上,各方向风沙流结构与全年总体特征一致,部分通量廓线出现了戈壁风沙流的“象鼻效应”。

库姆塔格沙漠北部三垄沙地区的输沙强度以春、夏两季节最为强烈,输沙方向以N、NE和NW方向为主,与沙丘走向和运动方向基本一致。在强烈的风力作用下沙粒继续向南转移,联系库姆塔格沙漠北部和东北部的风沙地貌发育过程,容易推断出三垄沙也为库姆塔格沙漠北部和东北部沙丘的形成提供了一部分沙物质来源。但要证明这点,还需对三垄沙地区的风况特征进行长时间序列的观测,通过对风向分布特征、起沙风、输沙势和输沙量的空间分布特征及三者之间关系的研究,建立起沙风、输沙势和输沙量之间的关系方程,将野外观测和室内模拟研究结合起来,更好地揭示该区域的风沙运动规律。

参考文献:

[1] 李振山,倪晋仁. 风沙流研究的历史、现状及其趋势[J]. 干旱区资源与环境,1998,12(3):90-98.

[2] 柳本立,张伟民,刘小宁,等. 莫高窟顶戈壁偏东风作用下输沙率变化的观测研究[J]. 中国沙漠,2010,30(3):516-521.

[3] 廖空太,李耀辉,刘虎俊,等. 库姆塔格沙漠羽毛状沙垄风沙活动强度特征[J]. 中国沙漠,2008,28(3):399-404.

[4] 屈建军,井哲帆,张克存,等. HDPE蜂巢式固沙障研制与防沙效应实验研究[J]. 中国沙漠,2008,28(4):599-604.

[5] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes [M]. London, UK: Methuen, 1941: 265.

[6] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: I. nature of movement of soil by wind[J]. Soil Science, 1945, 60(4): 305-320.

[7] Chepil W S. Dynamics of wind erosion: II. initiation of soil movement[J]. Soil Science, 1945, 60(5): 397-411.

[8] Chepil W S, Woodruff N P. The physics of wind erosion and its control I[J]. Advances in Agronomy, 1963, 15: 211-302.

[9] 兹纳门斯基 a n. 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, 2003: 120.

[10] 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, 19(11): 1099-1104.

[11] 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.

[12] 张克存,屈建军,俎瑞平,等. 戈壁风沙流结构和风速廓线特征研究[J]. 水土保持研究, 2005, 12(1): 54-58.

[13] 张克存,屈建军,俎瑞平,等. 戈壁、流沙地表风沙流特性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(10): 55-59.

[14] 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.

[15] 韩致文,缙倩倩,杜鹤强,等. 新月形沙丘表面 100 cm 高度内风沙流输沙量垂直分布函数分段拟合[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 892-897.

[16] 董玉祥, Hesp P A, Namikas S L, 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[J]. 中国沙漠, 2008, 28(6): 1022-1028.

[17] 董治宝,屈建军,钱广强,等. 库姆塔格沙漠风沙地貌区划[J]. 中国沙漠, 2011, 31(4): 805-814.

[18] 俄有浩,苏志珠,王继和,等. 库姆塔格沙漠综合科学考察成果初报[R]. 2006: 26, 693-697.

[19] 王涛. 中国沙漠与沙漠化[M]. 石家庄: 河北科学技术出版社, 2003: 689-698.

[20] 王继和,丁峰,廖空太,等. 库姆塔格沙漠综合考察的主要进展[J]. 干旱区研究, 2009, 26(2): 243-248.

[21] 杨转玲,钱广强,董治宝,等. 库姆塔格沙漠北部三垄沙地区风成沉积物粒度特征[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 589-596.

[22] 朱震达,赵兴梁,凌裕泉,等. 治沙工程学[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 34-36.

[23] 武建军,何丽红,郑晓静. 跃移层中沙粒浓度分布特征的研究[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2002, 38(3): 15-21.

[24] 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.

[25] Butterfield G R. Near-bed mass flux profiles in aeolian sand transport; high-resolution measurements in a wind tunnel[J]. Earth Surface Processes & Landforms, 1999, 24(24): 393-412.

[26] Dong Z, Lu J, Man D, et al. Equations for the near-surface mass flux density profile of wind-blown sediments[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011, 36: 1292-1299.

[27] Dong Z, Liu X, Wang H, et al. The flux profile of a blowing sand cloud; a wind tunnel investigation[J]. Geomorphology, 2003, 49: 219-230.

[28] Liu X, Dong Z. Experimental investigation of the concentration profile of a blowing sand cloud[J]. Geomorphology, 2004, 60: 371-381.

[29] Yang P, Dong Z, Qian G, et al. Height profile of the mean velocity of an aeolian saltating cloud; wind tunnel measurements by particle image velocimetry[J]. Geomorphology, 2007, 89: 320-334.

[30] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 196-201.

[31] 韩致文,董治宝,王涛,等. 塔克拉玛干沙漠风沙运动若干特征观测研究[R]. 2003;33,255—263.

[32] 张正德,董治宝,赵爱国,等. 库姆塔格沙漠风沙活动特征[J]. 干旱区地理,2010,33(6):939—946.

Aeolian Sediment Transport in the Sanlongsha Area to the North of Kumtagh Desert

Yang Zhuanling^{1,2}, Qian Guangqiang¹, Dongzhibao¹, Luo Wanyin¹, Zhang Zhengcai¹, Lu Junfeng¹, Li Jiyan¹

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The development of aeolian geomorphology is controlled by near surface sand movement, whereas the current research pays more attention to the short period (a few minutes to a few hours) and single direction (facing the main direction) of the blowing sand structure characteristics, and it is difficult to relate the results to the long-term geomorphological processes. Thus, we conducted a whole year field observation of aeolian sediment transport from May 2014 to May 2015 in the Sanlongsha Area of the Northern Kumtagh Desert, adopting the eight-directional four layer gradient sand trap (SEDST). After continuous observation of six periods, totally obtained 192 sand samples from different directions and different heights. Observation results show that the total weight of the captured sediments is 405.2 kg within 1 m above the ground and 75.3% of them are transported within 0—0.2 m, reflecting the characteristics of near surface sediment transport. The average sediment transport rate is $55.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, with sediments mainly from the N, NE and NW directions, and there is significant diversity in different seasons, and the maximum transport rate in spring is 2.5 times of the annual average value, followed by summer and winter minimum. The annual average sediment flux profile (blowing sand structure) shows exponential decline trend, part of the flux profile has presented the "trunk effect" over the gobi surface. The annual mean net flux is $1.159 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, along with the increase of the height decreased, and the variation of net flux with altitude at different time periods is consistent with that of the whole year; the annual mean resultant sediment transport direction is 193.2° , and the direction of sediment transport increases with the increase of the height from the northeast to the north. In conclusion, the sediment transport intensity reaches the strongest in the spring, and the main sediment transport direction is N, NE and NW, with a secondary sediment transport direction, S direction, in spring and summer, respectively. The study has great significance for the further understanding aeolian sediment transport of Sanlongsha area and revealing the material sources of Kumtagh desert.

Key words: Kumtagh Desert; Sanlognsha; wind sand flow; blowing sand structure; sediment transport rate