

流动沙丘风沙流结构的定量研究

王翔宇¹, 朴东均^{1,2}, 丁国栋¹, 尚润阳³, 高 函¹, 王伟伟¹, 孙 果⁴

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 韩国国立山林科学院, 韩国 首尔 130-712; 3. 海河水利委员会, 天津 300170; 4. 宁夏盐池县环境保护与林业局, 宁夏 盐池 751500)

摘 要:在对野外风沙流进行实测的基础上,运用拟合曲线、拟合方程等方法对0~48 cm垂直高度层内风沙流结构进行了分析研究。结果表明:0~48 cm高度内总输沙率及各高度层输沙率均与风速呈幂函数关系;各高度层输沙率百分比与风速呈指数函数关系;各高度层输沙率与高度呈幂函数或指数函数关系;上、中、下各层输沙率与总输沙率呈良好的幂函数关系。

关键词:风沙流结构;输沙率;拟合曲线

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2008)02-0036-04

Study of the Wind-sand Flow Structure on Flowing Sand

WANG Xiang-yu¹, Dongkyun PARK^{1,2}, DING Guo-dong¹, SHANG Run-yang³,
GAO Han¹, WANG Wei-wei¹, SUN Guo⁴

(1. College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation & Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2. Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712; 3. Haihe River Water Conservancy Committee, Tianjin 300170, China; 4. Yanchi Environmental Protection and Forestry Bureau, Ningxia, Yanchi 751500, China)

Abstract: On the basis of open country sandstorm, the usage drew up to match curve and drew up to match fitting equation etc. method perpendicular and high sandstorm inside the layer to flow structure to carry on an analytical research to 0—48 cm. The result express; the sand transporting rate in 0—48 cm height inside and each high layer all present the power function relation with wind velocity; the rate percentage of sand transporting in each high layer and wind velocity to present the exponential function relation; the rate of sand transporting in each high layer and height to present the power function or the exponential function relation; the sand transporting rate in upper, middle and lower layers all present the good power function relation with the rate of sand transporting in 0—48 cm height inside.

Key words: the wind-sand flow structure; sand transporting rate; fitting of curves

风沙运动规律是治沙的理论基础,风沙流结构又是风沙运动的核心^[1]。风沙流结构是指气流搬运沙子在高度层上的分布。它能直接表征沙粒的运动形式,判断地表的蚀积状况,掌握风成地貌的形态发育及演变规律,在沙漠治理的理论与实践占有重要地位^[2]。研究风沙流结构是为有效控制流沙而采取科学的措施提供依据。对风沙流的系统研究始于20世纪30年代。在30—50年代期间英国工程师拜格诺(R. A. Bagnold)经过多次利比亚荒漠考察和一系列风洞实验,出版了《风沙物理及荒漠沙丘物理学》。近年来,国内外学者在颗粒运动特征、风沙流结构、输沙率模型、临界风速等方面作了大量研究,并取得了突破性进展^[3]。但是,这些研究大都局限在地表20 cm的高度层中,对较大高度层中

的风沙流结构研究甚少。为此,我们利用手持风速仪、组合式多通道通风机集沙仪对野外0~48 cm高度的风沙流进行了实测。实验证明,风沙流在50 cm高度左右仍有分布。

影响风沙流结构的因素很多,比如风速、沙量、下垫面等。各因素之间不仅本身在变化,相互之间也存在促进或制约的关系^[1]。本文主要研究风速对风沙流结构的影响。

1 研究区概况

实验选在宁夏盐池县进行。盐池县位于宁夏回族自治区东部,地理坐标北纬37°04′—38°10′,东经106°30′—107°41′。盐池北部风沙区地处我国大陆腹地,位于毛乌素沙地西南缘,自治区东部,处于鄂尔多斯台地向黄土高原过渡地

收稿日期:2007-03-16

基金项目:沙区农田和草场风蚀防控与人居环境安全保障技术研究(2005BA517A05);国家科技支撑课题(2006BAD26B03);国家自然科学基金项目(30471422)

作者简介:王翔宇(1983—),男,在读硕士,主要从事荒漠化防治研究。E-mail: yhlhllxz@163.com

通信作者:丁国栋(1963—),男,教授,主要从事荒漠化防治研究。

带。该区地貌类型复杂,地形起伏较大,土地类型以滩地、平地、缓坡地、丘陵地、沙丘地为主。该地区由于远离海洋,气候干燥,降水量少,多年平均降水量 296.5 mm,年际变化幅度高达 30%以上,且降水多分布在 7—9 月,占全年降水量的 65%以上,蒸发量为降水量的 5~7 倍,无霜期 124 d,≥ 10℃的有效积温 2 945℃,年日照时数为 2 867.3 h,全年太阳辐射总量为 140 kJ/cm²[4]。

2 实验地条件及实验方法

2.1 实验地条件

观测点选在盐池县王乐井乡官滩村的流动沙丘顶部。该区主要气候特点是风多而大,常出现沙尘暴,最大风力可达 11 级,多集中在 11 月和翌年 4 月,主要风向为西北风。该区无地表过境河流,土壤水分补给主要靠大气降水,地下水多埋深在 3~5 m 以下,植物难以利用。实地观测表明,该

区起沙风速为 4.85 m/s。

2.2 实验方法

在沙地上设置 3 组组合式多通道通风集沙仪,同时对应三台三杯风速仪。每组集沙仪分为 0~3,3~6,⋯,21~24,⋯,42~45,45~48 cm 16 个高度层。测定时,风速仪插在 2 m 高程处,集沙仪安置在地面上,并和风向平行,使集沙仪的进沙口与风向垂直。每次集沙时间为 10 min,10 min 内每隔 1 min 记录一次风速,共记录 8 次。测定结束后,风速取 8 次的平均值,集沙量取 3 组的平均值作为本次记录的数据。

3 结果与分析

对所集的沙称重,换算成平均输沙率 $Q[g/(cm^2 \cdot min)]$,换算后的结果见表 1。表 2 为对应的输沙率百分比。

表 1 不同风速下各高度层的输沙率 g/(cm² · min)

高度/ cm	风速/(m · s ⁻¹)									
	7.50	7.69	8.45	8.70	9.00	9.60	9.90	10.10	10.20	10.80
0~3	0.7466	0.8727	0.9945	1.4861	1.9923	2.1536	2.2287	2.4401	2.5441	3.1701
3~6	0.2744	0.3117	0.3488	0.5182	0.6779	0.7231	0.6574	0.6791	0.7207	0.9813
6~9	0.0544	0.0714	0.0864	0.1372	0.1975	0.2188	0.2320	0.2673	0.2978	0.4242
9~12	0.0057	0.0136	0.0205	0.0419	0.0751	0.1059	0.1492	0.2006	0.2347	0.4050
12~15	0.0042	0.0070	0.0115	0.0240	0.0388	0.0572	0.1199	0.1748	0.2106	0.3586
15~18	0.0024	0.0036	0.0067	0.0125	0.0243	0.0348	0.0646	0.1257	0.1686	0.2999
18~21	0.0022	0.0032	0.0054	0.0102	0.0163	0.0203	0.0418	0.1146	0.1346	0.1923
21~24	0.0021	0.0028	0.0039	0.0082	0.0132	0.0162	0.0182	0.0254	0.0621	0.1169
24~27	0.0015	0.0025	0.0033	0.0054	0.0080	0.0149	0.0161	0.0164	0.0380	0.1051
27~30	0.0011	0.0016	0.0019	0.0052	0.0077	0.0085	0.0096	0.0127	0.0156	0.0408
30~33	0.0008	0.0010	0.0013	0.0038	0.0055	0.0064	0.0068	0.0106	0.0098	0.0291
33~36	0.0005	0.0009	0.0013	0.0036	0.0055	0.0061	0.0064	0.0070	0.0098	0.0173
36~39	0.0003	0.0005	0.0006	0.0032	0.0049	0.0057	0.0064	0.0061	0.0085	0.0148
39~42	0.0003	0.0004	0.0006	0.0023	0.0043	0.0051	0.0057	0.0057	0.0076	0.0148
42~45	0.0003	0.0004	0.0006	0.0020	0.0037	0.0041	0.0043	0.0053	0.0063	0.0093
45~48	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0009	0.0014	0.0018	0.0020	0.0022	0.0037
总输沙率	1.0969	1.2934	1.4874	2.2640	3.0759	3.3821	3.5689	4.0934	4.471	6.1832

表 2 各高度层输沙率百分比 %

高度/ cm	风速/(m · s ⁻¹)									
	7.5	7.69	8.45	8.7	9	9.6	9.9	10.1	10.2	10.8
0~3	68.06	67.47	66.86	65.64	64.77	63.68	62.45	59.61	56.90	51.27
3~6	25.01	24.10	23.45	22.89	22.04	21.38	18.42	16.59	16.12	15.87
6~9	4.96	5.52	5.81	6.06	6.42	6.47	6.50	6.53	6.66	6.86
9~12	0.52	1.05	1.38	1.85	2.44	3.13	4.18	4.90	5.25	6.55
12~15	0.38	0.54	0.77	1.06	1.26	1.69	3.36	4.27	4.71	5.80
15~18	0.22	0.28	0.45	0.55	0.79	1.03	1.81	3.07	3.77	4.85
18~21	0.20	0.25	0.36	0.45	0.53	0.60	1.17	2.80	3.01	3.11
21~24	0.19	0.22	0.26	0.36	0.43	0.48	0.51	0.62	1.39	1.89
24~27	0.14	0.19	0.22	0.24	0.26	0.44	0.45	0.40	0.85	1.70
27~30	0.10	0.12	0.13	0.23	0.25	0.25	0.27	0.31	0.35	0.66
30~33	0.07	0.08	0.09	0.17	0.18	0.19	0.19	0.26	0.22	0.47
33~36	0.05	0.07	0.09	0.16	0.18	0.18	0.18	0.17	0.22	0.28
36~39	0.03	0.04	0.04	0.14	0.16	0.17	0.18	0.15	0.19	0.24
39~42	0.03	0.03	0.04	0.10	0.14	0.15	0.16	0.14	0.17	0.24
42~45	0.03	0.03	0.04	0.09	0.12	0.12	0.12	0.13	0.14	0.15
45~48	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06

表 3 0~48 cm 输沙率(Q_{0-48})与 2 m
高处风速(V)的关系式

关系式	相关系数 r	相关选择 ($n=30$)
$Q_{0-48} = 0.0001V^{4.5976}$	0.9806	最佳
$Q_{0-48} = 0.0246e^{0.5109V}$	0.9804	较佳
$Q_{0-48} = 1.395V - 9.7343$	0.9615	相关
$Q_{0-48} = 12.401\ln V - 24.336$	0.9499	相关

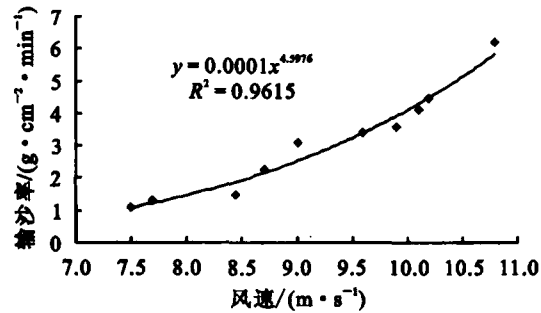


图 1 0~48 cm 输沙率随风速的变化

3.1 0~48 cm 总输沙率与风速的关系

由表 1 可知,总输沙率随风速的增大而增大,将二者进行曲线拟合,并对所得关系式进行分析。具体关系式及相关

表 4 各高度层输沙率与风速的回归系数及相关系数

高度/cm	A 值	b 值	相关系数	高度/cm	A 值	b 值	相关系数
0~3	0.0003	3.970	0.9750	24~27	2×10^{-12}	10.126	0.9618
3~6	0.0004	3.269	0.9488	27~30	2×10^{-11}	8.883	0.9672
6~9	1×10^{-6}	5.372	0.9816	30~33	9×10^{-12}	9.065	0.9677
9~12	2×10^{-12}	11.073	0.9888	33~36	1×10^{-11}	8.896	0.9673
12~15	7×10^{-14}	12.255	0.9899	36~39	3×10^{-13}	10.435	0.9502
15~18	5×10^{-15}	13.299	0.9864	39~42	2×10^{-13}	10.598	0.9652
18~21	2×10^{-14}	12.559	0.9722	42~45	1×10^{-12}	9.640	0.9642
21~24	2×10^{-12}	10.155	0.9614	45~48	8×10^{-15}	11.349	0.9525

表 5 各高度层输沙率百分比与风速的回归系数及相关系数

高度/cm	A 值	b 值	相关系数	高度/cm	A 值	b 值	相关系数
0~3	1.2048	0.072	-0.8858	24~27	7.3282	0.040	0.9841
3~6	0.8034	0.150	-0.9367	27~30	3×10^{-5}	0.483	0.9488
6~9	0.0282	0.085	0.9368	30~33	2×10^{-5}	0.498	0.9462
9~12	3×10^{-5}	0.717	0.9807	33~36	2×10^{-5}	0.455	0.9261
12~15	6×10^{-6}	0.856	0.9848	36~39	3×10^{-6}	0.624	0.8952
15~18	1×10^{-6}	0.972	0.9817	39~42	2×10^{-6}	0.653	0.9348
18~21	2×10^{-6}	0.893	0.9475	42~45	6×10^{-6}	0.541	0.9178
21~24	2×10^{-5}	0.626	0.9282	45~48	5×10^{-7}	0.674	0.9282

3.4 一定风速下输沙率及百分比随高度的分布

由于集沙仪是按高度 3 cm 分层的,于是取每个高度层

系数见表 3。

从相关系数 r 看,总输沙率与风速之间的最佳关系为幂函数,其次为指数函数。总输沙率随风速的变化曲线见图 1。

3.2 各层输沙率与风速的关系

把表 1 中同一高度层的输沙率与风速之间,在指数、对数、幂和直线 4 种函数关系下进行曲线拟合,发现各高度层输沙率与风速间的最佳拟合关系为幂函数,其方程形式为 $Q = AV^b$ 。各高度层输沙率与风速的回归系数及相关系数见表 4。由表 4 可知,各高度层输沙率均随风速的增大而增大。由 b 值可以看出,风速对 9 cm 以上高度层输沙率的影响要远大于对 9 cm 以下高度层输沙率的影响。

3.3 各高度层输沙率百分比与风速的关系

对各高度层输沙率百分比与风速进行曲线拟合,结果表明,各高度层输沙率百分比与风速的最佳关系是指数函数,符合公式 $Q(\%) = Ae^{bV}$ 。各高度层输沙率百分比与风速的回归系数及相关系数见表 5。

由表 5 可以看出,0~3,3~6 cm 高度层的输沙率百分比随风速的增加而减小,6 cm 高度层以上输沙率百分比随高度的增加而增大。这与丁国栋等的研究结果一致^[2,5]。

表 6 一定风速下输沙率及百分比随高度分布的关系式

风速/($m \cdot s^{-1}$)	关系式	相关系数	风速/($m \cdot s^{-1}$)	关系式	相关系数
7.5	$Q = 4.8774H^{-2.6014}$	-0.9782	10.1	$Q = 1.1285e^{-0.1399H}$	-0.9732
	$Q/\% = 4.2267H^{-2.5746}$	-0.9787		$Q/\% = 0.2747e^{-0.1396H}$	-0.9729
8.45	$Q = 8.0378H^{-2.5434}$	-0.9729	10.2	$Q = 1.3726e^{-0.1374H}$	-0.9797
	$Q/\% = 5.0901H^{-2.5317}$	-0.9782		$Q/\% = 0.3066e^{-0.1373H}$	-0.9798
9.6	$Q = 10.847H^{-2.1032}$	-0.9836	10.8	$Q = 2.0786e^{-0.1305H}$	-0.9832
	$Q/\% = 3.2269H^{-2.1062}$	-0.9833		$Q/\% = 0.336e^{-0.1305H}$	-0.9863
9.9	$Q = 12.752H^{-2.0863}$	-0.9736			
	$Q/\% = 3.5764H^{-2.0867}$	-0.9735			

由表 6 可知,无论是输沙率还是输沙率百分比,当风速

上、下限的平均值作为该高度层的高度,然后把这个高度作为自变量与输沙率及输沙率百分比之间进行曲线拟合。

小于 10 m/s 时,均与高度成幂函数关系;而当风速大于 10

m/s 时则成指数函数关系。但不论哪种函数关系,输沙率和输沙率百分比均随高度的增加而减小。

3.5 上、中、下各层输沙率与总输沙率的关系

为了更清楚揭示 0~48 cm 风沙流的结构特征,根据不同风速下总输沙率在各高度层的分布及其变化趋势,将 0~48 cm 分为 3 个高度层,上层 24~48 cm,中层 3~24 cm,下层 0~3 cm。各层输沙率与风速的拟合方程见表 7。

表 7 不同高度输沙率与总输沙率的关系

高度/ cm	关系式	相关 系数 r	相关选择 ($n=30$)
0~3	$Q_{0\sim3} = 0.7138 (Q_{0\sim48})^{0.8651}$	0.9961	最佳
	$Q_{0\sim3} = 1.3903 \ln(Q_{0\sim48}) + 0.4855$	0.9943	相关
	$Q_{0\sim3} = 0.4959 Q_{0\sim48} + 0.3297$	0.9874	相关
	$Q_{0\sim3} = 0.6762 e^{0.2947 Q_{0\sim48}}$	0.9449	相关
3~24	$Q_{3\sim24} = 0.2973 (Q_{0\sim48})^{1.1823}$	0.9971	最佳
	$Q_{3\sim24} = 0.465 Q_{0\sim48} - 0.2685$	0.9906	相关
	$Q_{3\sim24} = 0.2629 e^{0.4186 Q_{0\sim48}}$	0.9831	相关
	$Q_{3\sim24} = 1.213 \ln(Q_{0\sim48}) - 0.0326$	0.9281	相关
24~48	$Q_{24\sim48} = 0.0041 (Q_{0\sim48})^{2.1129}$	0.9960	最佳
	$Q_{24\sim48} = 0.0033 e^{0.7447 Q_{0\sim48}}$	0.9774	相关
	$Q_{24\sim48} = 0.0391 Q_{0\sim48} - 0.0613$	0.9197	相关
	$Q_{24\sim48} = 0.0952 \ln(Q_{0\sim48}) - 0.0348$	0.8047	不相关

由表 7 可以看出,各层的输沙率均随总输沙率的增加而增加,呈良好的幂函数关系。符合关系式 $y = Ax^b$; 设函数 $Z = Q/TQ$, 则

$$Z_{0\sim3} = Q_{0\sim3} / Q_{0\sim48} = 0.7138 (Q_{0\sim48})^{0.8651} / Q_{0\sim48} = 0.7138 (Q_{0\sim48})^{-0.1349}$$

$$Z_{3\sim24} = Q_{3\sim24} / Q_{0\sim48} = 0.2973 (Q_{0\sim48})^{1.1823} / Q_{0\sim48} = 0.2973 (Q_{0\sim48})^{0.1823}$$

$$Z_{24\sim48} = Q_{24\sim48} / Q_{0\sim48} = 0.0041 (Q_{0\sim48})^{2.1129} / Q_{0\sim48} = 0.0041 (Q_{0\sim48})^{1.1129}$$

式中: Z ——各高度层的相对输沙率。

可以看出,符合关系式 $Z = Ax^d$ 。由于, $d_{0\sim3} < 0 < d_{3\sim24} < 1 < d_{24\sim48}$, 说明 0~3 cm 高度层的相对输沙率随总输沙率的增加而减小, 3~24 cm 高度层、24~48 cm 高度层的相对输沙率随总输沙率的增加而增加, 而 24~48 cm 高度层的变化幅度要远大于 3~24 cm 高度层。

4 结 论

(1) 流动沙丘 0~48 cm 输沙率与风速成幂函数关系, 关系式为 $Q_{0\sim48} = 0.0001V^{4.5976}$ 。

(2) 各高度层输沙率均随风速的增加而增大, 6 cm 以下高度层输沙率百分比随风速的增加而减小, 6 cm 以上高度层输沙率百分比随风速的增加而增大。

(3) 在风速一定的条件下, 各高度层输沙率或输沙率百分比均随高度的增加而减小。

(4) 上、中、下 3 层的输沙率均随总输沙率的增大而增大; 下层相对输沙率随总输沙率的增大而减小, 中、上层的相对输沙率随总输沙率的增大而增大。

参考文献:

- [1] 马世威. 风沙流结构的研究[J]. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8-22.
- [2] 丁国栋, 奥村武信. 风沙流结构的风洞实验研究[J]. 内蒙古林学院学报, 1994, 16(1): 40-46.
- [3] 李钢铁, 贾玉奎, 王永生. 乌兰布和沙漠风沙流结构的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1): 276-278.
- [4] 李生宝, 蒋齐. 盐池沙地综合治理优化模式的建立及其结构调整[J]. 农业系统科学与综合研究, 1999, 15(2): 143-148.
- [5] 丁国栋. 野外风沙流结构的定量研究[J]. 内蒙古林业科技, 1994(4): 38-40.

(上接第 25 页)

坝龄的增加, 阻力特性发生了根本变化, 阻水效果进一步增强, 坝内水流形态的复杂多变, 致使局部泥沙淤积无一定规律, 坝前断面处泥沙淤积呈细化趋势, 但从整体上看坝内泥沙淤积也呈细化趋势。(2) 坝内植物群落稳定后, 泥沙淤积更多地受到坝内水流宽度、深度、流量、沟底比降等因素的影响, 坝内纵向变化无一定规律。(3) 种植沙棘“柔性坝”的沟道, 从上游到下游沿程泥沙粒径呈递减趋势, 而且对粒径 > 0.25 mm 的粗颗粒泥沙具有较好的分选效果。从而证明沙棘“柔性坝”具有改善沟道输沙特性, 实现了对泥沙的天然分选、淤粗排细的功能, 最终达到水沙分治的目的。因此, 加快在粗泥沙集中来源区沙棘“柔性坝”的建设, 对有效减少入黄粗泥沙、实现黄河下游河床不抬高将起到一定的积极作用。

参考文献:

- [1] 毕慈芬. 砒砂岩地区沟道植物“柔性坝”拦沙试验[J]. 中国水土保持, 2002(5): 18-19.
- [2] 毕慈芬, 王富贵, 李桂芬, 等. 砒砂岩地区沟道植物“柔

性坝”拦沙试验[J]. 泥沙研究, 2003(2): 14-25.

- [3] 李怀恩, 同新奇, 张康, 等. 沙棘“柔性坝”对土壤水分调控作用的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(11): 69-72.
- [4] 杨方社, 李怀恩, 杨联安, 等. 小流域沙棘植物柔性坝系累积水保效应原型试验[J]. 泥沙研究, 2006(4): 10-14.
- [5] 刘锋, 邱秀云, 周著, 等. 植物“柔性坝”在不同底坡下水流特性的试验研究[J]. 新疆农业大学学报, 2005, 28(3): 53-57.
- [6] 张建军, 毕华兴, 张宝颖. 坡面水土保持林地地表径流挟沙能力研究[J]. 北京林业大学学报, 2003, 25(5): 25-28.
- [7] 李根前, 唐德瑞, 赵一庆. 沙棘群落生态学研究概述[J]. 水土保持学报, 2000, 14(5): 63-67.
- [8] 邱秀云, 阿不都外力, 程艳, 等. 植物“柔性坝”对水流影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(9): 62-65.
- [9] 陈云明, 陈永勤. 人工沙棘林水文水土保持作用机理研究[J]. 西北植物学报, 2003, 23(8): 1357-1361.