

黄河乌兰布和沙漠段沿岸不同高度典型沙丘风沙特征

尹瑞平¹, 郭建英¹, 董智², 何京丽¹, 李锦荣¹, 田世民³, 代豫杰²

(1. 水利部牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 2. 山东农业大学 林学院,
山东 泰安 271018; 3. 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

摘要:为探究乌兰布和沙漠沿岸典型沙丘的风速流场与风沙运移特征,以3座不同高度的典型沙丘为研究对象,对沙丘不同部位5个高度的风速流场、风速廓线、风速加速率及输沙量进行了测定。结果表明:(1)风速从沙丘迎风坡脚至背风坡脚呈现先增大后减小再增大的“S”型趋势,沙丘顶部风速最大,背风坡中部最小。(2)沙丘各部位风速的垂直变化与高度的对数值呈 $V=a\ln(z)+b$ 线性变化规律,风速廓线斜率 a 由沙丘顶部向迎风坡脚与背风坡脚逐渐增大。不同高度沙丘的摩擦流速与粗糙度变化趋势不一。(3)沙丘发育尺度对沙丘迎风坡风速加速率影响明显,其沙丘发育尺度越大,对气流的反馈作用越强,迎风坡低层20 cm风速加速率明显高于高层风速加速率;(4)沙丘不同部位0~100 cm的输沙率随高度呈幂函数规律递减,输沙量主要集中在0~10 cm内,但不均匀,大部分集中在0~4 cm,且在距地高度约4~5 cm处是相对输沙量不随高程变化的不变层。

关键词:风速流场; 风速廓线; 风沙流; 乌兰布和沙漠

中图分类号:P931.3

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0157-05

Wind Velocity and Sand Flow Transport Characteristics of Different Height Typical Dunes in Ulan Buh Desert Along the Yellow River

YIN Ruiping¹, GUO Jianying¹, DONG Zhi², HE Jingli¹, LI Jinrong¹, TIAN Shimin³, DAI Yujie²

(1. *Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010010, China*; 2. *College of Forestry, Shandong Agricultural University, Taian, Shandong 271018, China*; 3. *Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China*)

Abstract: Flow fields of wind speed and aeolian transport are concerned by scientists because of its basic position in desert research. We took 3 typical dunes with different heights as samples and measured flow fields of wind, wind profiles, velocity accelerations, sediment discharges of 5 heights of different parts. Results show that: (1) wind velocity is greater over the top of dune but lowest at central leeward and appears to increase firstly and decrease later and increase eventually from dune windward slope foot to leeward slope foot, showing the tendency of ‘S’ shape; (2) vertical changes of wind at different parts of dune and height changes of logarithmic follows the linear regression equation [$V=a\ln(z)+b$], slope of wind profile increases gradually from top of dune to slope foot of windward and leeward, friction velocity and roughness changes appear inconsistently; (3) wind velocity acceleration of low-rise (20 cm) is higher than high-rise; dune development scale impacts wind velocity acceleration of windward obviously, and feedback is significant with its growth; (4) sediment discharges of different dune parts within 0~100 cm show a uneven law of diminishing power function and concentrate in 0~10 cm, and distribute in 0~4 cm mostly. Relative sediment discharges are stable and do not transform with height changes.

Keywords: wind velocity flow field; sand flow; wind profile; Ulan Buh Desert

风沙运移是指沙物质在风力搬运中的物理运动过程,掌握风沙运移规律可为防沙治沙体系的建设提供理论指导,并可推演沙丘的演变过程^[1]。已有的风沙运移规律涉及区域风能环境及其变化^[2-4],风沙流结构特征与风沙通量模型构建等^[5-9]。从风沙流的形成与运动来看,风力、沙量和下垫面是影响风沙流运动的三个要素,其中风力是促进或制约风沙流流动的动力,沙量的多少直接影响着风沙流的运移,而下垫面对风沙流的影响就变得十分复杂^[10]。特别地,风速流场在空间上的分布,将改变近地表的粗糙度、涡旋尺度和沙物质运移特征,但关于沙丘形态特别是沙丘高度对风速流场及风速廓线的影响研究尚未见报道。黄河乌兰布和沙漠段毗邻黄河,地理位置独特,沙丘形态及表面粒度特征较沙漠腹地有较大区别^[11]。该段直接危害黄河的流沙段超过 20 km,每年向黄河输沙约 7.72×10^7 kg,占该区域黄河含沙量的 37%^[12],风沙流传输与沙丘前移是沿岸风成沙入黄的主要途径^[13]。该段沙丘形态以新月形沙丘及沙丘链为主,沙丘高度明显不同,以往的研究主要集中于沙丘固定程度与风速和风沙流的研究^[5-6,14],关于沙丘高度与风速流场的关系研究不够重视。沙丘高度的差异直接影响沙丘运动的速度,而其本质就是风速在沙丘表面的分布状况的差异。基于此,本研究以乌兰布和沙漠沿黄段的刘拐沙头为试验区域,选择 3 种不同高度的沙丘,开展沙丘不同部位的风速与风沙流结构的测定,旨在阐明不同高度沙丘上的风速流场与风速廓线分布,揭示沙丘不同部位风沙流运移与沙丘运动的本质,为黄河沿岸入黄风积沙综合治理工程提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黄河乌兰布和沙漠刘拐沙头风蚀观测场内,距离黄河 500~1 000 m,地理坐标 $40^{\circ}09'52.28''\text{N}$, $106^{\circ}50'37.60''\text{E}$ 。该区属于典型的中温带大陆性干旱季风气候,气候干旱,大风天气频繁,易发沙尘暴。年平均气温 8.0°C ,降水量为 142.7 mm,蒸发量高达 2 372 mm^[15]。研究区多年 ≥ 5 m/s 的主风向为 SW—W,占 61.69%,次主风方向为 WNW—NW 和 NE—ENE,分别占 13.73%和 12.32%,年平均风速 3.7 m/s,大风和风沙一年四季均有出现,多集中于 3—5 月份;年均大风日数 10~32 d,平均扬沙日数 75~79 d,沙尘暴日数 19~22 d。研究区流动沙

丘广布,沙丘高度 4~10 m,土壤为典型风沙土,植被主要有白刺(*Nitraria tangutorum* Bobr.)、霸王(*Zygophyllum xanthoxylon* Maxim)、梭梭(*Haloxylon ammodendron* (C. A. Mey.) Bunge)、沙蓬(*Agriophyllum squarrosum* Vahl.)、沙旋覆花(*Inula salsoloides* (Turcz.) Ostenf.)、沙竹(*Psammodictyon illosa* Trin.)等^[15]。

1.2 沙丘不同部位风速分布与风速流场的测定

于 2014 年、2015 年的 4—6 月份在黄河乌兰布和沙漠刘拐沙头风蚀监测场内,选取 3 座规格不同的新月形沙丘,沙丘高度分别为 2.3 m、5.2 m 和 10.1 m,宽度为 37.8 m、58.4 m 和 109.2 m,将沙丘按高度变化分别编号为 A、B、C 沙丘。选择典型大风日,分别在 3 座沙丘的迎风坡坡脚(1[#]测点)、迎风坡中部(2[#]测点)、沙丘顶部(3[#]测点)、背风坡中部(4[#]测点)与背风坡坡脚(5[#]测点)5 个测点同时布设 HOBO 气象站风速仪(图 1),测定沙丘不同部位的风速垂直梯度变化,测定高度分别为 20 cm、50 cm、100 cm、150 cm 和 200 cm,风向架设高度为 250 cm;风速仪每隔 5 min 自动记录各高度观测数据的平均值与最大值。根据测定的风速平均值,利用 Furfur 10.0 绘制各沙丘的风速流场等值线图。

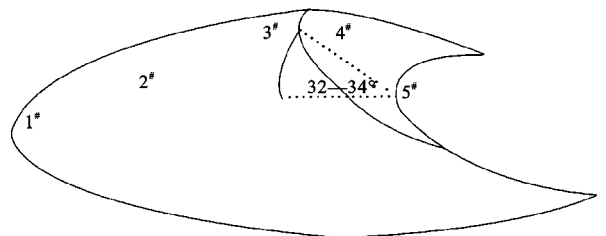


图 1 沙丘表面风速观测示意图

1.3 沙丘不同部位风速廓线与粗糙度计算

采用各沙丘 HOBO 气象站 5 个高度的风速测定值,采用的最小二乘逼近实测风速廓线法(简称对数廓线法)^[16],拟合各部位的风速廓线方程,计算摩阻流速与粗糙度,各公式为:

$$u_z = b + a \times \ln z \quad (1)$$

式中: u_z 为 z 高度处风速; a 、 b 为回归系数。

令式(1)中 $u_z = 0$ 可求出粗糙度:

$$z_0 = \exp\left(\frac{-b}{a}\right) \quad (2)$$

将公式(1)代入普朗特—冯卡曼的速度对数分布规律公式:

$$u_z = (u_* / k) \ln(z / z_0) \quad (3)$$

式中: u_z 同公式(1); u_* 为摩阻速度; k 为冯卡曼常数(0.4); z_0 为空气动力学粗糙度。

1.4 沙丘不同部位输沙量的测定

与风速测定同步,在 3 座沙丘的迎风坡坡脚、迎风坡坡中和迎风坡坡顶(1[#]、2[#]和 3[#]测点)布设旋转式集沙仪测定输沙量。集沙仪进沙口 50 层,每层进沙口的宽、高为 2 cm×2 cm。观测时将集沙仪最下部的进沙口与沙面平齐并垂直放置,即可观测 0~100 cm 风沙流的输沙量。在不同风速条件下,共进行 30 次野外观测,每次测定时间为 3~30 min,采集时将沙样倒入自封袋,按层次编号,带回室内烘干后用百分之一的电子天平进行称量。分层统计各层次输沙量,获得不同沙丘不同部位的风沙流结构,并进而对相对输沙率与高度的关系进行拟合分析,揭示输沙量沿高度梯度的垂直分布规律。

2 结果与分析

2.1 沙丘不同部位风速变化与风速流场

对沙丘表面风场流场变化的研究,是建立合理风沙防护体系的根本。3 个沙丘不同部位的风速变化与风速流场见图 2。由图可知,3 个不同高度沙丘的风速流场变化趋势一致,即迎风坡风速由坡脚向沙丘顶部呈逐渐增强的趋势,风速流场流线加密,并在丘顶风速达到最大;在背风坡风速由丘顶向背风坡脚迅速下降,在背风坡中部形成涡旋,风速降至最低,在背风坡坡脚形成次低区。3 个沙丘的风速为同步测定,但在不同部位风速的变化各不相同。3 个沙丘迎风坡脚的近地表 20 cm 风速基本一致,为 6.5 m/s,但因沙丘高度不同,使得风速在各部位的分布与变化随着沙丘高度的增加而迅速增大。沙丘 A 迎风坡中部与丘顶 20 cm 处的风速分别较迎风坡脚同一高度风速增大 9.6%与 27.7%,而沙丘 B 与沙丘 C 迎风坡中部和丘顶 20 cm 处风速较迎风坡脚同高度风速增大 24.8%,90.0%与 56.1%,126.3%。而在背风坡中部与坡脚,沙丘 A,B,C 近地表 20 cm 处风速分别较各沙丘迎风坡脚近地表风速下降 33.9%,12.8%,34.8%,26.9%和 58.1%,40.3%,显然,随着各沙丘高度的增加,背风坡风速受到沙丘自身高度遮挡作用的影响,风速明显下降,且沙丘背风坡中部下降幅度大于背风坡坡脚。由风速流场可知,沙丘表面的风场变化与沙丘形态有着密切的关系。由迎风坡坡脚至沙丘顶部,气流受沙丘阻挡作用,随地形抬升风速逐渐增大,到沙丘顶部时达到最大。气流越过沙丘顶部后,地形陡降,气流扩散,在背风坡产生回流涡旋低速区,因此风速得到大幅度减小。自背风坡以下,气流扩散缓慢,并叠加背风坡二次流,其风速逐渐增大。

2.2 沙丘不同部位风速廓线与粗糙度变化

风速廓线表征风速随高度的垂直分布规律,是研究近地表气流特征的重要指标之一。对不同高度沙丘各部位的风速与测定高度的对数值进行拟合,获得沙丘各部位的风速廓线图(图 2)。由图可知,沙丘各部位风速的垂直分布遵循对数线性定律,即风速的垂直变化与高度的对数值呈 $V=a\ln(z)+b$ 线性变化规律(图 3,表 1)。

风速廓线方程 $V=a\ln(z)+b$ 的斜率 a 反映了风速垂直变化梯度的大小,因沙丘高度不同,使得不同高度沙丘迎风坡、丘顶与背风坡各部位风速的垂直分布变化并不一致,由表 1 可知,不同沙丘各部位风速廓线斜率 a 的变化均表现为由迎风坡坡脚向沙丘顶部风速垂直梯度迅速增加的趋势,表现在风速廓线的斜率由迎风坡脚向沙丘顶部呈减小趋势,而在背风坡又表现为由沙丘顶部向沙丘背风坡坡脚迅速增大的趋势,说明在背风坡由于气流的分离与涡旋作用,使得风速垂直变化梯度增大,斜率变大。

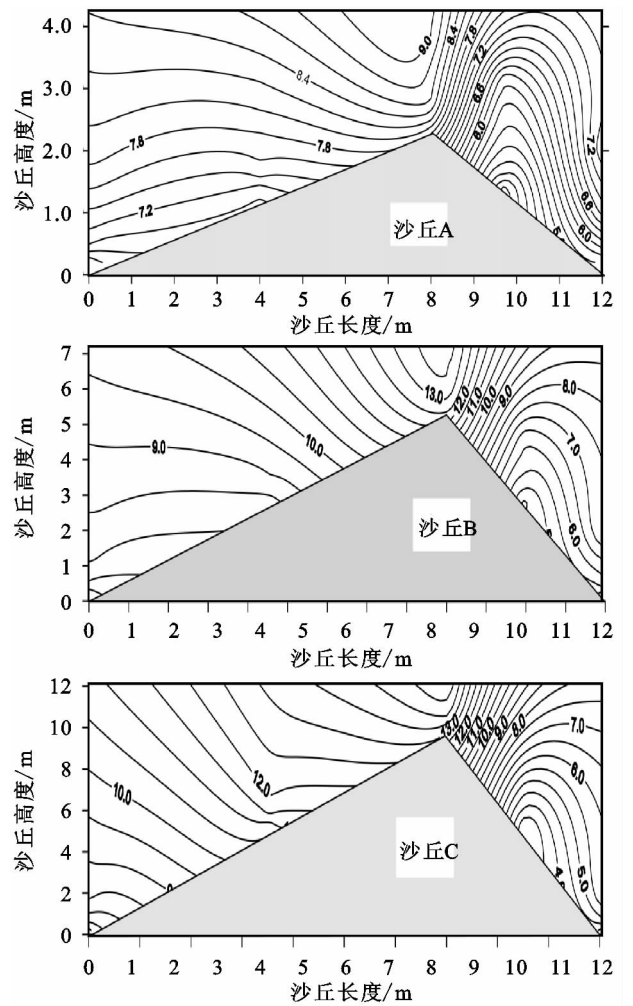


图 2 不同高度沙丘的风速流场

由表 1 可知,沙丘 A,B,C 不同部位的摩阻流速与粗糙度也存在差异。对于同一沙丘而言,摩阻流速

呈现由迎风坡脚向沙丘顶部逐渐减小的趋势,而在背风坡则又表现为由沙丘顶部向沙丘背风坡脚逐渐减小的趋势;对于不同高度的沙丘而言,摩阻流速在迎风坡的同一部位均呈现随着沙丘高度的增加而增加的趋势,而在背风坡的摩阻流速则均表现为沙丘 B>沙丘 C>沙丘 A。对于同一沙丘的粗糙度变化而言,

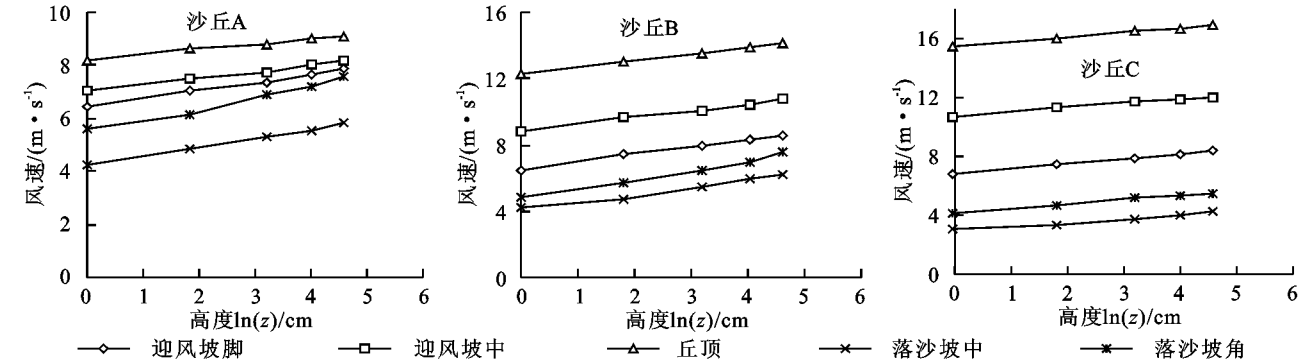


图 3 沙丘表面不同部位风速变化

表 1 风速廓线拟合方程

沙丘部位		沙丘 A	沙丘 B	沙丘 C
迎风坡脚	方程	$V=0.6189\ln(z)+4.584$ ($R^2=0.993$)	$V=0.7179\ln(z)+4.608$ ($R^2=0.984$)	$V=0.7453\ln(z)+4.612$ ($R^2=0.990$)
	u_*	0.251	0.306	0.311
	z_0	0.6×10^{-3}	1.6×10^{-3}	2.1×10^{-3}
迎风坡中	方程	$V=0.4812\ln(z)+5.6009$ ($R^2=0.982$)	$V=0.5488\ln(z)+6.5472$ ($R^2=0.982$)	$V=0.6337\ln(z)+8.7684$ ($R^2=0.995$)
	u_*	0.190	0.197	0.247
	z_0	8.8×10^{-6}	6.6×10^{-6}	9.8×10^{-7}
沙丘顶部	方程	$V=0.3656\ln(z)+7.1309$ ($R^2=0.988$)	$V=0.5203\ln(z)+10.975$ ($R^2=0.981$)	$V=0.5553\ln(z)+11.850$ ($R^2=0.971$)
	u_*	0.152	0.196	0.230
	z_0	3.4×10^{-9}	6.9×10^{-10}	5.4×10^{-10}
背风坡中	方程	$V=0.6740\ln(z)+2.2096$ ($R^2=0.992$)	$V=0.7708\ln(z)+2.0005$ ($R^2=0.990$)	$V=0.7736\ln(z)+0.4659$ ($R^2=0.980$)
	u_*	0.262	0.279	0.274
	z_0	3.8×10^{-2}	7.5×10^{-2}	5.6×10^{-1}
背风坡脚	方程	$V=0.8599\ln(z)+2.9279$ ($R^2=0.982$)	$V=1.1334\ln(z)+1.3597$ ($R^2=0.985$)	$V=1.0943\ln(z)+1.4656$ ($R^2=0.965$)
	u_*	0.300	0.403	0.366
	z_0	3.3×10^{-2}	3.0×10^{-1}	2.6×10^{-1}

注: u_* 为摩阻流速(m/s), z_0 为近地表粗糙度(cm)。

2.3 沙丘迎风坡不同部位风速加速率变化

在对新月形沙丘表面气流研究过程中,经常引入风速加速率,其表示形式为 $S=u_c/u_f$, 其中 S 为风速加速率, u_c 与 u_f 分别为沙丘丘顶与迎风坡坡脚处同一高度的风速。由观测结果可得,迎风坡表面风速在不同高度均有增大趋势(表 2)。不同高度风速加速率不尽相同,低层 20 cm 风速加速率明显高于高层风速加速率。其主要原因是由于受沙丘地形的影响所致。通过对不同高度沙丘间风速加速率的对比发现,沙丘 A 的风速加速率均较小。由于沙丘 A 较为低矮,气流受地形扰动较小,故迎风坡坡脚处风速与沙丘顶部风速差异较小。3 个不同发育尺度沙丘的风速加速率差异显著,风速加速率也呈加

粗糙度以沙丘顶部最小,分别向迎风坡脚和背风坡脚增大,且以背风坡中部或坡脚位置最大;而不同高度沙丘同一部位的粗糙度则表现不同,迎风坡脚、背风坡中部和坡脚,粗糙度表现为沙丘 C>沙丘 B>沙丘 A,迎风坡中部和沙丘顶部的粗糙度急剧降低,3 个沙丘的粗糙度表现为沙丘 A>沙丘 B>沙丘 C。

速趋势,其大小依次为沙丘 C>沙丘 B>沙丘 A。说明沙丘发育尺度对风速加速率影响显著,即沙丘发育尺度越大,对气流的反馈作用越强,其风速加速率越大。

表 2 新月形沙丘迎风坡不同高度风速加速率

风速高度/cm	1 [#] 沙丘	2 [#] 沙丘	3 [#] 沙丘
20	1.28a	1.89b	2.26c
50	1.22a	1.75b	2.20c
100	1.19a	1.74b	2.11c
150	1.17a	1.67b	2.07c
200	1.15a	1.65b	1.98c

2.4 风沙流结构的基本特征

在沙丘迎风坡坡脚、坡中、丘顶部位,不同风速条

件下 0~100 cm 相对输沙量与高度之间有着良好的幂函数关系,在 0.01 显著性水平上决定系数 R^2 均达到 0.95 以上。0~100 cm 高度的输沙量的 81.75% 集中在 0~10 cm 内,30 cm 以上高程的输沙量平均不足 7%,该结果与吴正等的观测结果基本一致。在 0~10 cm 内输沙率并非均匀分布,其主要集中在 0~4 cm 内,平均占 60.37%(图 4)。在距地高度约 4~5 cm 处,沙丘不同部位的相对输沙量有一个交点,即该处为相对输沙量不随高程变化的不变层。

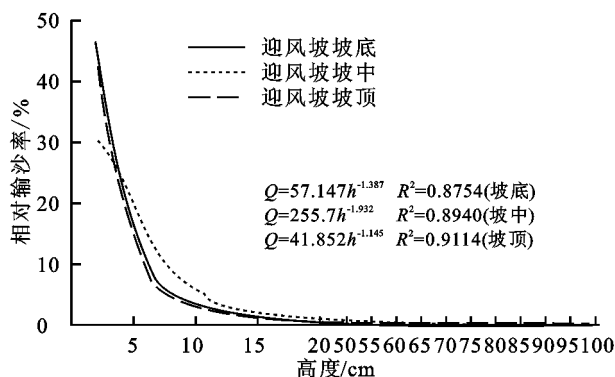


图4 沙丘不同部位近地表风沙流结构变化

3 结论

(1) 3个沙丘迎风坡风速由坡脚向沙丘顶部呈逐渐增强的趋势,背风坡则由丘顶向坡脚呈减小趋势,但风速以背风坡中部最小。因沙丘高度不同,各部位风速变化并不一致,但均以丘顶风速变化幅度最大。

(2) 沙丘各部位风速的垂直变化与高度的对数值呈 $V=a\ln(z)+b$ 线性变化规律,风速廓线斜率 a 由沙丘顶部向迎风坡脚与背风坡脚逐渐增大。不同高度沙丘的摩阻流速呈由迎风坡脚和背风坡脚向沙丘顶部逐渐减小的趋势;而粗糙度在迎风坡中部和沙丘顶部的粗糙度表现为沙丘 $A>$ 沙丘 $B>$ 沙丘 C ,其他部位呈现沙丘 $C>$ 沙丘 $B>$ 沙丘 A 的趋势。

(3) 迎风坡风速加速率与沙丘发育尺度有明显关系,沙丘发育尺度越大,对气流的反馈作用越强,其风速加速率越大,且以近地表 20 cm 的风速加速更加明显。

(4) 在沙丘迎风坡坡脚、坡中、丘顶部位,0~100 cm 高程内风沙流的输沙率随高度呈幂函数规律递减,且输沙量 81.75% 集中在 0~10 cm 内,其主要集中在 0~4 cm 内,平均占 60.37%;在距地高度约 4~

5 cm 处,相对输沙量不随高程变化而变化;30 cm 以上的输沙量平均不足 7%。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌及治沙工程学[M]. 北京:科学出版社, 2003:61-69.
- [2] 张正偲,董治宝. 黑河流域中游沙漠风能环境与风沙地貌[J]. 中国沙漠,2014,34(2):332-341.
- [3] 张正偲,董治宝,钱广强,等. 腾格里沙漠西部和西南部风能环境与风沙地貌[J]. 中国沙漠,2012,32(6):1528-1533.
- [4] 哈斯,王贵勇,董光荣. 腾格里沙漠东南缘格状沙丘表面气流及其地貌学意义[J]. 中国沙漠,2000,20(1):31-35.
- [5] 王翠,李生字,雷加强,等. 近地表风沙流结构对过渡带不同下垫面的响应[J]. 水土保持学报,2014,28(3):52-56,71.
- [6] 刘芳,郝玉光,辛智鸣,等. 乌兰布和沙漠东北缘地表风沙流结构特征[J]. 中国沙漠,2014,34(5):1200-1207.
- [7] 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(S1):276-278.
- [8] Dong Z B, Lu J F, Man D Q, et al. Equations for the near surface mass flux density profile of wind-blown sediments [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011,36(10):1292-1299.
- [9] Mertie R S, Santra P, Kandpal B K, et al. Mass-height profile and total mass transport of wind eroded Aeolian sediments from rangelands of the India Thar Desert[J]. Aeolian Research, 2010(2):135-142.
- [10] 姚洪林,闫德仁,胡小龙,等. 毛乌素沙地流动沙丘风蚀积沙规律研究[J]. 内蒙古林业科技,2001(1):3-7.
- [11] 何京丽,郭建英,邢恩德,等. 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,2012,28(17):71-77.
- [12] 杨根生,拓万全,戴丰年,等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J]. 中国沙漠,2003,23(2):54-61.
- [13] 杨根生,刘阳宣,史培军. 黄河沿岸风成沙入黄沙量估算[J]. 科学通报,1987(3):1017-1021.
- [14] 董智. 乌兰布和沙漠绿洲农田沙害及其控制机理研究[D]. 北京:北京林业大学,2004.
- [15] 陈新闻,郭建英,董智,等. 乌兰布和沙漠沿黄段不同土地利用类型对土壤分形特征的影响[J]. 干旱区资源与环境,2015,29(11):169-173.
- [16] 刘小平,董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠,2003,23(4):337-346.