

青海湖沙地人工治理沙丘的风速廓线变化特征

吴汪洋¹, 张登山^{1,2}, 田丽慧¹, 赵超¹, 贾飞飞¹

(1. 北京师范大学 环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 2. 青海省农林科学院, 西宁 810016)

摘要:对青海湖湖东沙地麦草方格沙障结合沙棘实生苗的人工治理沙丘进行风速廓线及其风沙防护效益研究, 结果表明, 人工治理措施明显降低了沙丘各部位的近地层风速, 增强了高层风速。与流动沙丘相比, 垂向风速增加率的差异使人工治理沙丘不同部位的超越高度值出现“坡脚>坡中>丘顶”的规律。风速垂向气流的变异导致不同高度层的防风固沙效果不同, 低层风沙防护效益显著高于中、高层。同时结合坡度, 植被盖度等因子, 分析了影响风速廓线的变化原因, 从而为青海湖沙地人工治理效果进行评估与初步指导。

关键词:风速廓线; 人工治理沙丘; 风速增加率; 防风固沙

中图分类号: P931.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2013)06-0162-06

Variable Characteristics of Wind Profile of the Artificial Sand Dune in Sandy Land around the Qinghai Lake

WU Wang-yang¹, ZHANG Deng-shan^{1,2}, TIAN Li-hui¹, ZHAO Chao¹, JIA Fei-fei¹

(1. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Qinghai Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Xi'ning 810016, China)

Abstract: Through the study of wind profile and sand flow in the sand area of the eastern shore of Qinghai Lake, which the technique of straw-checkerboard combining with sea-buckthorn seeding is experimented and promoted, it can be found that the low layers wind speed decreased obviously while high layers got increased in each position of artificial sand dune compared with the mobile dune. This is mainly due to the vertical change rates of the wind speed. Moreover, there is a surpass height which is higher at the foot of the slope and lower at the top between the artificial and mobile sand dunes, which leads to the better effects of wind prevention and sand fixation in the surface layer. Besides the difference of sand dune gradient, vegetation coverage and the average sand grain size have effects on the change of the wind profile. These results above will make a preliminary evaluation and provide basic guide to the management of desertification around the Qinghai Lake.

Key words: wind profile; artificial sand dune; wind speed increase rate; wind prevention and sand fixation

在中性气层中, 近地层气流运动速度随高度增加呈现对数递增的变化规律, 这种风速沿高程的分布在风沙科学中称为风速廓线, 是研究风沙地貌, 风沙运动与危害的重要理论基础和有效途径^[1-2]。20 世纪 30 年代, Bagnold^[3] 率先提出此观点并开始应用于沙漠地区的风沙流结构研究, 随着室内风洞试验、计算机数字模拟等技术发展和应用, Owen 等^[4] 分别对 Bagnold 提出的风速廓线公式进行了卡曼常数的修改和起沙风条件下风速廓线的变化研究, 但总体上均认可风速廓线的对数分布规律^[3-4]。但理想的风速廓线是在定床实验中获取的, 在野外实地动床条件以及复杂的地表状况条件下, 风速的垂向变化具有不完全

对数规律, 尤其是风沙流结构中风速廓线的变异^[5-6]。对于植被覆盖的沙地地区, 气流受植被的影响被迫抬升, 风速廓线会相应地发生位移, 而其位移高度与植被高度具有一定的对数关系^[7-8]。地形也是影响野外风速廓线变化的重要因子, 李振山^[9]、哈斯等^[10] 从模拟到实地观测对沙丘不同部位的风况进行对比研究, 从坡长、坡度、坡高等地形差异分析风速廓线中风速放大率与垂向增加率的变化。另外, 沙丘表面沙粒粒径的大小也是影响空气粗糙度的重要因素。不同类型沙丘地表粗糙度意味着不同的气流垂线变化, 从而影响气流速度在高度上的梯度及其分布范围^[11-12]。众多学者已经对新月形沙丘和金字塔形沙丘表面不

同部位的风速廓线特征展开了研究,均反映气流沿迎风坡至丘顶,风速不断增加,而背风坡部位的风速廓线的对数变化规律表现不明显,从而影响了各类形态沙丘的形成与扩展^[13-15]。在很多沙障试验中,风速廓线的变异已成为治沙防风效益的重要手段,通过改变下垫面的性质影响气流的运动方向和能量在高度上的传输,进而防止土壤表面遭受侵蚀^[16-18]。对于沙区人工治理沙丘的气流场特征目前还缺乏足够的研究,植被、地形等因子对风速廓线的影响有待野外实证。

青海湖是我国最大的内陆咸水湖,地处青藏高原东北部。盆地构造与湖泊效应,加之高寒气候,使该区的风况环境具有风向多样、风速强、风季长的特点,这对环湖沙漠化的势态,沙丘形态和人工防治均产生了重大影响。近年来,通过机械、生物措施等的综合治理,湖滨一带众多流动沙丘逐渐演变为人工治理固定或半固定沙丘,但其风速廓线的变化和防风效益还没有进行系统的对比研究。故本文对青海湖沙地人工治理沙丘不同部位的风速廓线特征与变化进行初步研究,对比流动沙丘的风速廓线特征,参照风沙监测数据,探讨植被、地形等因子对人工治理沙丘的垂直气流变化特征和防风固沙效益的影响,从而为高寒沙区流沙治理工作提供理论支撑。

1 研究区概况

试验区选在青海湖湖东克土沙区,面积约为 753 km²,是青海湖流域面积最大的沙漠化地区之一。自 2008 年开展治理以来,已基本形成以麦草沙障为基础,结合多种高寒生物植被,进行沙区生态环境恢复的机械与生物措施相结合的治沙方法,大面积的半固定和流动沙丘得以稳固。其中观测的人工治理沙丘为 2008 年春季栽植的沙棘实生苗,秋季铺设 1.5 m × 1.5 m 麦草方格沙障,由于初期风蚀严重,于 2010 年 9 月在该沙丘补设相同规格的草方格沙障。2012 年春季植被调查中,沙棘株高 0.5~1.0 m,长势良好。根据近 4 a 的调查,沙棘已经逐步适应本区环境,在该区生物治沙中得到了广泛应用。

2 研究方法

2.1 观测点布设

在克土沙区选取人工治理沙棘沙丘和流动沙丘作为观测样带,丘顶海拔均为 3 188~3 191 m,沙丘高度均在 8~10 m,沙丘迎风坡为西北向。以样带西侧某一沙丘的平坦丘顶为基准点,以样带上两个沙丘的迎风坡脚、迎风坡中、丘顶、背风坡中、背风坡脚和背风坡丘间地 6 个沙丘部位为流动点,各观测点分布

于同一东西走向,相同部位风况环境相近。

2.2 数据采集

本文主要采用 2012 年春季风沙观测数据,通过梯度风速仪采集各沙丘各部位 9 个高度层(0.1,0.2,0.5,1.0,1.5,2.0,2.5,3.5,4.5 m)的风速数据,基准点与流动点同步观测,数据采集器的抽样频率为 1 次/min,测风时段为 4 月 11 日 14:50—17:10、4 月 20 日 10:00—17:00 和 4 月 24 日 10:20—20:00。另辅以人工治理沙棘半固定沙丘(简称人工治理沙丘)和流动沙丘的集沙数据(采用平口式积沙仪,与风速观测同步进行),收集各风沙观测点的植被盖度,地形坡度等数据用以分析人工治理沙丘的风沙防护效益和影响气流场的变异因素。

2.3 分析方法

统计基站点与流动点每 10 min 的平均风速值,采用标准化公式:

$$U'(z) = \frac{U_{\text{对照}}(t_0, z=2)}{U_{\text{对照}}(t, z=2)} \times U(t, z)$$

式中: $U(t, z)$ ——某一高度 t 时段的风速值; $U_{\text{对照}}(t_0, z=2)$ ——基站 t_0 时刻 2 m 高度的风速值; $U_{\text{对照}}(t, z=2)$ ——基站点任一时刻 2 m 高度的风速值; $U'(z)$ ——任意测点在高度 z 上的标准化风速。

对不同观测点不同时间的风速数据进行标准化处理,使其风速在同一时段进行比较。以标准化风速为横轴,以高程对数为纵轴绘制风速廓线图,通过曲线拟合的拟合系数 R^2 分析不同类型沙丘不同部位的风速廓线特征。另外计算粗糙度 z_0 ,风速增加率 R 和防风效益 F 等指标分析人工治理沙丘与流动沙丘的气流场特征,其中

$$\lg z_0 = \frac{\lg z_2 - \lg z_1}{1 - A}, \quad A = u_2 - u_1$$

式中: u_2, u_1 —— z_2 和 z_1 高度下的风速值。

$$R = \frac{U_2 - U_1}{U_1 \times H} \times 100\%$$

式中: H —— z_2 与 z_1 的高度差; U_2, U_1 —— z_2, z_1 高度的风速值。

$$F = \frac{U_0 - U}{U_0} \times 100\%$$

式中: U_0 ——流动沙丘不同部位的的平均风速; U ——人工治理沙丘对应部位观测点的平均风速。

3 结果与分析

3.1 不同部位的风速变化特征

3.1.1 风速廓线特征 在理想条件下,风速(u)与高度的对数值 $[\lg(z)]$ 成正比,即以高程对数为纵轴的风速廓线为一条单调递增的直线。根据图 1 和图

2 的结果分析,人工治理沙丘和流动沙丘各部位主要表现出比较显著的线性或对数函数的拟合同律。其中人工治理沙丘除背风坡脚外,其余部位的线性拟合系数均在 95%左右,与对数函数拟合相比,迎风坡中与丘顶部位风速廓线的线性拟合系数最高,但迎风坡脚和背风坡部位的风速廓线表现出对数拟合性强于线性拟合性,这反映出人工治理沙丘整体上遵循较好

的风随高度的对数变化规律,但在局部上也体现出人工治理对风速廓线变化的推导作用。流动沙丘除丘间地之外,其余各部位风速廓线的线性拟合均接近 95%,高于对数拟合,符合流动沙丘各部位显著的线性变化规律;而丘间地由于植被高度相对较高,加之背风坡低层涡流的存在,风速廓线已无显著的函数拟合关系。

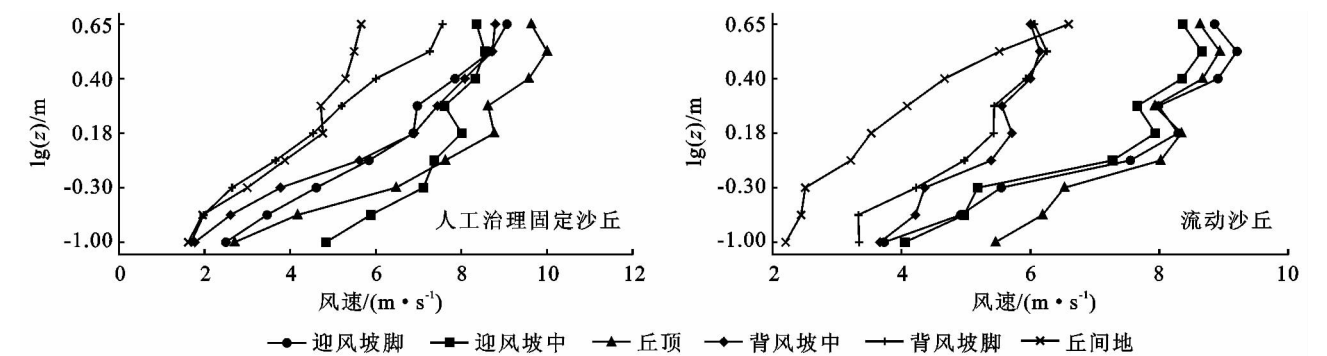


图 1 人工治理沙丘与流动沙丘不同部位的风速廓线

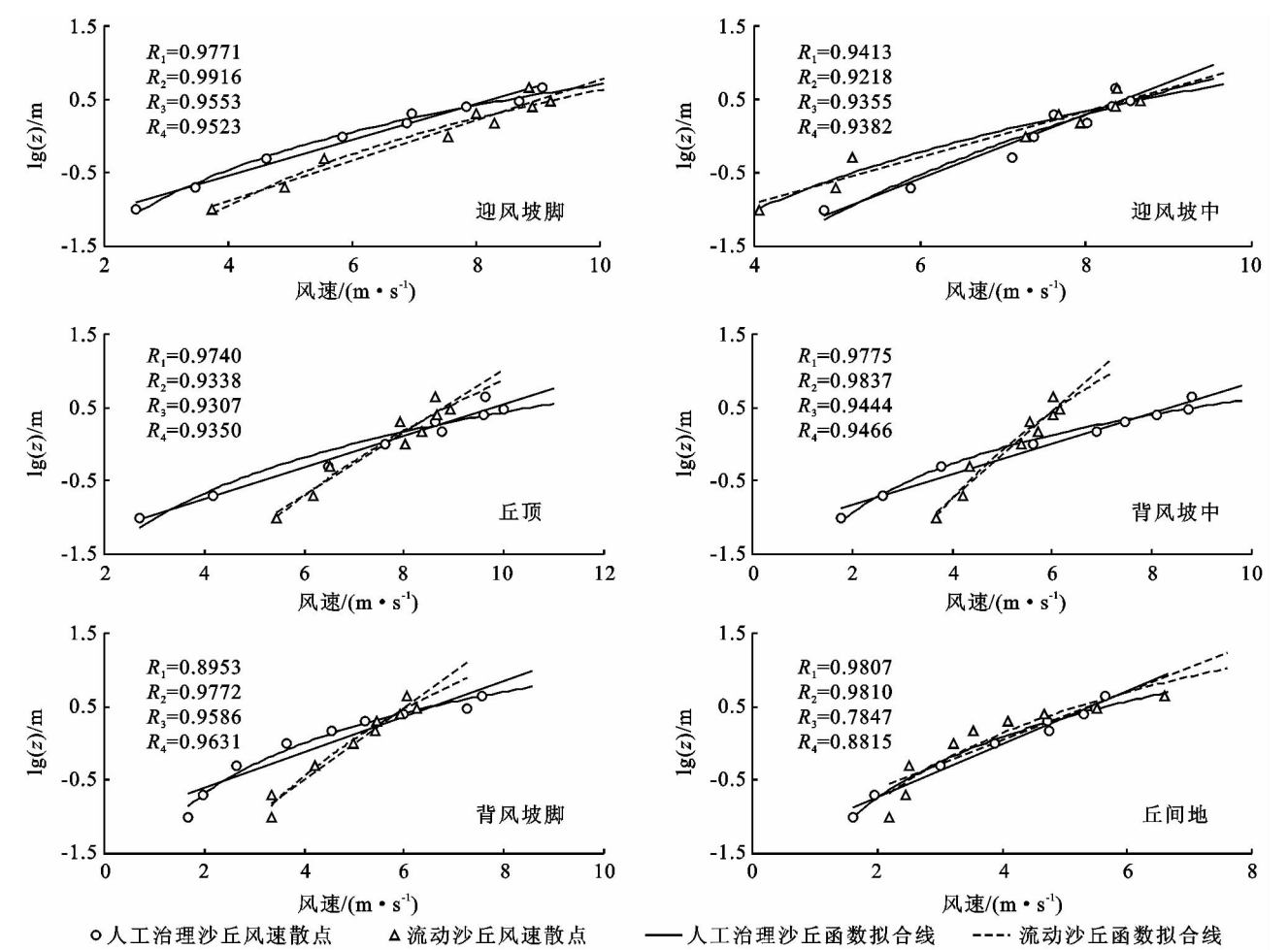


图 2 不同沙丘部位风速廓线的线性与对数函数拟合

注: R_1 ——人工治理沙丘线性拟合系数; R_2 ——人工治理沙丘对数拟合系数; R_3 ——流动沙丘线性拟合系数; R_4 ——流动沙丘对数拟合曲线。

从同一类型沙丘不同部位的风速变化特征分析,人工治理沙丘与流动沙丘在各高度上的风速值表现为丘顶>迎风坡>背风坡>丘间地的规律,然而,人

工治理沙丘存在部分差异,1 m 高度以下迎风坡中的风速大于丘顶,背风坡丘间地大于背风坡脚;流动沙丘丘顶风速在 2 m 以上气层中小于迎风坡脚,且迎风

坡中的风速始终小于迎风坡脚。从不同类型沙丘同一部位角度分析,迎风坡脚、丘顶、背风坡中和背风坡脚 4 处沙丘部位在某一高度层上存在人工治理沙丘风速超越流动沙丘的现象,这一超越高度值可以通过计算两个沙丘的最优拟合函数曲线的交点在风速相等情况下求得。据观测(图 2),迎风坡脚、丘顶、背风坡中和背风坡脚的人工治理沙丘风速超越流动沙丘的高度分别在 5.5,1,0.5,1.5 m 左右。超越高度值的大小反映人工治理措施减弱地表风蚀的程度,两者呈负相关。迎风坡中和背风坡丘间地出现人工治理沙丘低层风速高于流动沙丘的现象,这种异常分别源自人工治理沙丘迎风坡中的海拔高度较同部位的流动沙丘偏高 1.5 m 左右,流动沙丘背风坡丘间地存在较强的二次流作用。

3.1.2 风速增加率 风速增加率是反映风速廓线变化特征与气流能量垂向分配的重要指标,风速随高度增加逐渐增大,但其增速不断减小。通过统计沙丘各部位 3 个高度层(低层:0~1.0 m,中层 1.0~2.5 m,高层 2.5~4.5 m)的风速增加率(表 1)可知,人工治理沙丘低层、中层、高层的增速范围分别为 0.5%~

2.0%,0.05%~0.5%,0.002%~0.15%;可见人工治理沙丘低层风速增加率大于中高层,且达到中层的 6~12 倍,高层的 20~200 倍。从沙丘部位差异来看,迎风坡中和背风坡脚的低层风速增加率较小,丘顶与背风坡中的风速增加率较大,中高层则表现为背风坡各部位的风速增加率最大,迎风坡至丘顶,低层风速增加率是高层风速的 200 多倍而背风坡与丘间地,只有 10~40 倍。由此得知,人工治理沙丘迎风坡部位风速在垂直高度上的变化大于背风坡,这是迎风坡风速大于背风坡,以及气流沿迎风坡低层爬升的增速大于背风坡气流低层降速的体现。流动沙丘的风速增加率在高度上的变化也是低层>中层>高层,增幅范围分别为 0.5%~1.2%,0.05%~0.1%,0.006%~0.2%;在部位差异上,迎风坡低层增速大于背风坡,中高层则出现丘顶风速增幅最低。与人工治理沙丘相比,流动沙丘各高度层的增速均低于人工治理沙丘,这与线性拟合的斜率值变化相符合,而在部位上,人工治理沙丘迎风坡中部位的风速增加率低于流动沙丘,各高度层背风坡部位风速增加率大于丘顶,流动沙丘则是迎风坡部位大于背风坡部位。

表 1 人工治理沙丘与流动沙丘不同部位的垂向风速增加率 %

沙丘类型	部位	迎风坡脚	迎风坡中	丘顶	背风坡中	背风坡脚	丘间地
人工治理沙丘	低层	1.487	0.582	2.019	2.402	1.299	1.548
	中层	0.229	0.086	0.171	0.293	0.426	0.244
	高层	0.077	0.002	0.003	0.044	0.130	0.034
流动沙丘	低层	1.136	0.883	0.521	0.523	0.543	0.511
	中层	0.120	0.099	0.054	0.076	0.128	0.302
	高层	0.008	0.001	0.001	0.000	0.011	0.206

3.1.3 粗糙度 粗糙度是反映下垫面对气流产生的作用大小的指标,它能改变垂向流速梯度和各流速的梯度范围,通常代表风速为零的某一几何高度。根据观测点半对数高程图中风速廓线较为显著的线性拟合规律,可以通过 2 m 和 0.1 m 高度层的风速关系计算近地面粗糙度,对于植被盖度较大的观测点则根据地

表粗糙度为表土平均粒径的 1/9 求得(表 2)。人工治理沙丘除迎风坡中外,其余部位地面粗糙度均高于流动沙丘,这揭示了迎风坡中近地面风速值大于流动沙丘的异常原因。人工治理沙丘能有效提高零风速高度,与流动沙丘相比,丘顶和背风坡部位粗糙度提高了 2~4 倍,反映人工治理措施对地表粗糙度的改造效果。

表 2 不同沙丘类型不同部位粗糙度比较 cm

沙丘类型	迎风坡脚	迎风坡中	丘顶	背风坡中	背风坡脚	丘间地
人工治理固定沙丘	0.174	0.054	0.212	0.232	0.156	0.179
流动沙丘	0.138	0.104	0.044	0.044	0.048	0.042

3.2 人工治理沙丘的防风固沙效益

人工治理沙丘丘顶经过治理保护后,地表植被与机械沙障对高寒地区的地表风蚀起到了有效防护作用。根据图 3,迎风坡脚在垂向上整体防风效果最好,背风坡部位近地层防风效益最大,除迎风坡中部位的防风效益集中于 2 m 以上气层外,其余部位近地层的防风效果明显,1 m 以下气层中,迎风坡脚和背风坡部位防风效益达到 25%~38%,且具有背风坡

脚>背风坡中>丘顶>迎风坡脚>丘间地的规律。丘顶部位其 0.2 m 以下地表风速降低 41.5%,1 m 以下防风效益达到 22.3%;但在气流 1.5 m 以上的气流层,由于风速高于流动沙丘,其防风效益为-9.5%。可见,人工治理沙丘近地面防风效益明显,气流随着高度增加风速增加率大于同高度的流动沙丘,致使人工治理沙丘随高度增加防风效果愈不明显。

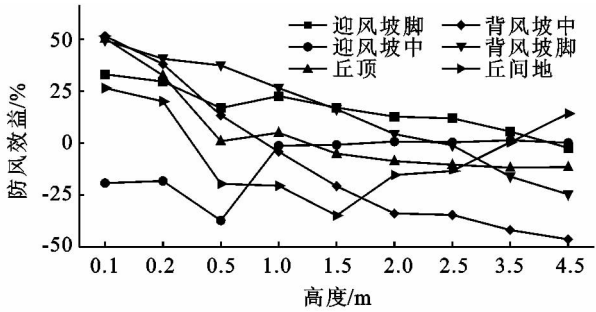


图3 人工治理沙丘不同部位防风效益随高度的分布变化

人工治理沙丘风速廓线的变化致使风沙流结构出现变异,实验得出,人工治理沙丘各部位起沙风通常大于7 m/s,2012年积沙结果显示,人工治理沙丘仅丘顶存在积沙现象。与流动沙丘相比,丘顶在8~10 m/s的风速条件下的输沙量明显降低,固沙效益达到86.9%~94.5%。在风沙流结构上,人工治理沙丘近地层输沙量明显低于其它类型沙丘,但在60 cm高度层上分布相对均匀(图4)。在8.5 m/s风速条件下,人工治理沙丘60 cm高度层上总输沙量为11.91 g,在0—2,2—10,10—60 cm高度层上输沙量分别为4.39,0.54,6.98 g,所占总输沙量百分比依次为:36.86%、4.54%、58.60%;流动沙丘总输沙量为61.02 g,各高度层的分布与所占百分比分别为:12.22 g,20.03%;38.89 g,63.73%;9.91 g,16.24%。人工治理沙丘在总输沙量以及0—10 cm高度层内输沙量均小于流动沙丘,其沙粒主要分布在10 cm以上的气层,这与人工治理沙丘丘顶风速廓线特征与风速增加率的变化规律相符。

3.3 垂向气流场变化的影响因素

植被盖度、植株高度、地形坡度与高度以及表土

沙粒粒径均是影响人工治理沙丘风速廓线与风沙流结构变异的因素。对观测点植被与地形条件的调查(表3)表明,对比流动沙丘,人工治理沙丘丘顶部位盖度增加93.7%,近地层风速降低15.4%;背风坡脚盖度增加25.4%,风速增加效益最大,达到27.2%;迎风坡中和丘间地盖度均小于流动沙丘,其风速值也对应偏小。地形坡度的大小是气流爬升过程中能量转移的重要动力条件,人工治理沙丘各部位坡度均小于流动沙丘,其中流动沙丘迎风坡中、背风坡中与丘间地部位坡度差异较大,严重影响了近地表的风速和垂向上的风速增加率。另外,沙棘的植株高度影响人工治理沙丘不同部位的低层防风效益,整体上,丘间地沙棘平均高度较小,低层防护效果不如其它部位。两个沙丘沙粒粒径的差异主要表现在迎风坡脚和丘间地部位,人工治理沙丘平均粒径较小,反映了沙棘植被的土壤改良效果,促进表土结皮,减少风蚀。以上因素共同影响着地表粗糙度,从而影响风速的垂向分布与变化,各因子的影响程度以及综合影响过程值得进一步探讨。但整体上植被盖度与地形坡度的差异,是改变风速廓线和防风效益的核心因子。

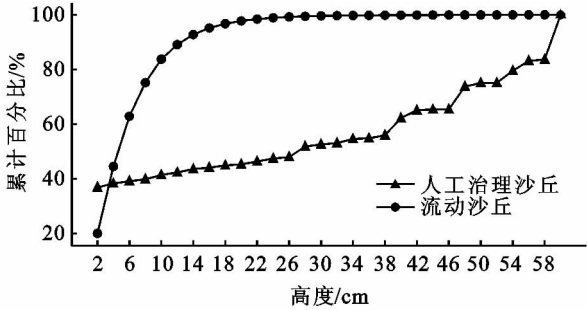


图4 不同类型沙丘丘顶输沙量随高度分布的累积百分比

表3 影响人工治理沙丘与流动沙丘风速变化的自然地理因子

沙丘部位	沙棘高度/ cm	植被盖度/%		地形坡度/(°)		表土平均粒径/mm	
		人工治理沙丘	流动沙丘	人工治理沙丘	流动沙丘	人工治理沙丘	流动沙丘
迎风坡脚	51.82	46.02	16.75	10.29	11.06	0.18	0.31
迎风坡中	46.98	22.61	16.87	14.83	20.35	0.25	0.30
丘顶	54.38	13.13	2.26	3.98	4.19	0.30	0.32
背风坡中	47.97	15.91	1.24	20.16	28.42	0.34	0.29
背风坡脚	52.61	18.41	28.33	24.96	27.68	0.31	0.32
丘间地	39.26	23.36	27.50	10.71	13.33	0.11	0.24

4 结论与讨论

(1) 人工治理沙丘各部位的风速廓线整体上表现出风速随高度呈对数变化的规律,但近地表风速的增长规律受到破坏。迎风坡中与丘顶,风速与高度呈较好的线性关系,而其余部位遵循较好的对数规律。由于近地表植被和麦草沙障对地表气流的阻滞作用,气流的风速增加率出现垂向变异,使人工治理沙丘的

风速在一定高度上超越同高度的流动沙丘,这一超越高度值则表现出背风坡高于丘顶和迎风坡中,坡脚高于坡中和丘顶的差异现象。

(2) 人工治理沙丘风速廓线的变异导致其治理措施的风沙防护效益出现明显的高度变化和沙丘部位差异,背风坡防护效果好于迎风坡,迎风坡中高层防护效益好于近地层。在丘顶,近地层1 m以下能有效减弱风速30%左右,同时使丘顶37.0%左右的沙

量分布于近地面 10 cm 高度之内,整体固沙效益达到 87%~95%。而植被盖度与地形坡度是人工治理沙丘风沙防护效益出现沙丘部位差异的主要影响因素。

(3) 人工治理沙棘沙丘不同部位风速廓线和防风固沙效益的研究充分反映出人工治理的效果良好,揭示其防风机制和主要影响因子。同时反映设置麦草方格沙障搭配沙棘实生苗的治沙措施对于高寒地区治沙工作而言,切实可行。但在工程规划中,地形和植被因子需要重点考虑,在沙丘不同部位塑造合适的植被环境和沙障规格以获取最大的防风固沙效果。

参考文献:

[1] 朱震达. 中国沙漠、沙漠化、荒漠化及其治理对策[M]. 北京: 中国环境出版社, 1999: 113-115.

[2] 吴正, 等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 2130.

[3] Bagnold R A. The Physics of Blown Sand and Desert Dunes[M]. New York: William Morrow & Company, 1941: 265.

[4] Owen P R. Saltation of uniform grains in air[J]. J. Fluid Mech., 1964, 20(2): 225-242.

[5] 董治宝, 慕青松, 王洪涛. 风沙流中风速廓线的数值模拟与实验验证[J]. 气象学报, 2008, 66(2): 158-166.

[6] 王洪涛, 董治宝, 钱广强, 等. 关于风沙流中风速廓线的进一步实验研究[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 721-724.

[7] 郭雨华, 赵廷宁, 丁国栋, 等. 灌木林盖度对风沙土风蚀

作用的影响[J]. 2006, 13(5): 245-251.

[8] 赵彩霞, 郑大伟, 何文清. 植被盖度的时间变化及其防风蚀效应[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 68-73.

[9] 李振山. 地形起伏对气流速度影响的风洞实验研究[J]. 水土保持研究, 1999, 6(4): 75-79.

[10] 哈斯, 王贵勇, 董光荣. 腾格里沙漠东南缘沙丘迎风坡风速变化的初步研究[J]. 干旱区地理, 1999, 22(1): 41-46.

[11] 杨明元. 对地表粗糙度测定的分析与研究[J]. 中国沙漠, 1996, 16(4): 383-387.

[12] Dong Z B, Gao S Y, Fryrear D W. Drag coefficients and roughness as disturbed by artificial standing vegetation[J]. Journal of Arid Environments, 2001, 49(3): 485-505.

[13] 张伟民, 李孝泽. 金字塔沙丘地表气流场及其动力学过程研究[J]. 中国沙漠, 1998, 18(3): 215-220.

[14] 盖世广, 王雪芹, 万金平, 等. 古尔班通古特沙漠半固定沙垄表面风速变化规律研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 30-34.

[15] 杜鹤强, 韩致文, 王涛, 等. 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, 2012, 32(1): 9-17.

[16] 张春来, 邹学勇, 程宏. 包兰铁路沙坡头段防护体系近地面流场特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2006, 14(3): 353-360.

[17] 吴晓旭, 邹学勇, 王仁德, 等. 毛乌素沙地不同下垫面的风沙运动特征[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 9-16.

[18] 张登山, 石昊, 魏殿生, 等. 青海湖湖东人工治理沙丘风沙流结构特征[J]. 林业科学, 2011, 31(4): 828-834.

(上接第 161 页)

[9] 王兮之, 梁钊雄, 周显辉, 等. 黄河源区玛曲县植被覆盖度及其气候变化研究[J]. 水土保持研究, 2012, 19(2): 57-65.

[10] 付新峰, 杨胜天, 刘昌明. 雅鲁藏布江流域 NDVI 时空分布及与站点气候因子的关系[J]. 水土保持研究, 2006, 13(3): 229-232.

[11] 姚雪茹, 刘华民, 裴浩, 等. 鄂尔多斯高原 1982—2006 年植被变化及其驱动因子[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 225-230.

[12] 杜加强, 舒俭民, 张林波. 1982—2006 年黄南州 NDVI 年际变化及其与气候的关系[J]. 水土保持通报, 2010, 30(4): 229-234.

[13] 陈云浩, 李晓兵, 史培军. 1983—1992 年中国陆地 ND-

VI 变化的气候因子驱动分析[J]. 植物生态学报, 2001, 25(6): 716-720.

[14] 张生军, 王涛, 王天明, 等. 新疆不同植被 NDVI 的变化及其与气候因子的关系[J]. 草业科学, 2010, 26(5): 26-31.

[15] 王桂钢, 周可法, 孙莉, 等. 天山山区草地变化与气候要素的时滞效应分析[J]. 干旱区地理, 2011, 34(2): 317-324.

[16] 李杨, 刘艳, 马丽云, 等. 天山北坡气候因子对植被影响的空间分异性研究[J]. 干旱区资源与环境, 2011, 25(7): 91-95.

[17] 谢国辉, 李晓东, 周立平, 等. 气候因子影响天山北坡植被指数时空分布研究[J]. 地球科学进展, 2007, 22(6): 618-624.