

低覆盖度灌木群丛的水平配置格局与 固沙效果的风洞试验

杨文斌^{1,2}, 杨红艳³, 卢琦^{1,*}, 吴波¹, 赵爱国⁴, 乐林²,
姚建成², 王晶莹², 胡小龙²

(1. 中国林业科学研究院林业研究所/国家林业局/中国防治荒漠化研究与发展中心, 北京 100091;

2. 内蒙古林业科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古环境科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010010;

4. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要:针对覆盖度为 18%~20% 的灌木固沙疏林, 在风洞内, 模拟了行带式、等株行距和随机不均匀等 3 种水平配置格局的风力侵蚀机理和固沙效果。结果表明: 1. 当风速为 10m/s 时, 行带式内吹风 30min 后不出现风蚀, 等株行距和随机模式内分别在吹风 8min 和 3min 出现风蚀; 2. 当风速增大为 15m/s 时, 行带式仅在模式内出现微弱的风蚀和积沙, 吹风 30min 后形成稳定的凹形沙面, 最大蚀、积厚度为 0.4cm 和 0.7cm, 没有形成风沙流, 而等株行距和随机模式则出现强风沙流, 吹风 30min 后, 模式内 65.57% 和 66.96% 的沙被吹走; 3. 等株行距主要风蚀灌丛空隙间的沙面, 随机配置主要风蚀灌丛分布的大空隙间的沙面, 而在灌丛相对集中的部位积沙, 因此形成非常复杂的沙面形状。

关键词:低覆盖度; 配置格局; 行带式; 沙面形状

文章编号: 1000-0933(2008)07-2998-10 中图分类号: Q948 文献标识码: A

Wind tunnel experiment on sand-fixation effects of sparse shrub communities varying in spatial arrangement

YANG Wen-Bin^{1,2}, YANG Hong-Yan³, LU Qi^{1,*}, WU Bo¹, ZHAO Ai-Guo⁴, LE Lin², YAO Jian-Cheng², WANG Jing-Ying², HU Xiao-Long²

1 Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory for Forest Tree Breeding of the State Forestry Administration of China, and National Research and Development Center for Combating Desertification of China, Beijing 10009, China

2 Inner Mongolia Academy of Forestry Science, Huhhot 010010, China

3 Inner Mongolia Environmental Science Academy, Huhhot 010010, China

4 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 2998~3007.

Abstract: In this study, we simulated wind erosion mechanism and sand-fixation effects of three shrub communities varying in spatial arrangement in a wind tunnel experiment with specific reference to sand-fixation forests at 18%—20% coverage. Plants within the three shrub communities were arranged as belts, equal-spacing, or random. Results showed that when wind speed was at 10m/s, wind erosion did not occur in the belt shrub community after 30 min of the treatment; whereas

基金项目: 30360089 和 30660155, G2000048705, 国家“十五”科技攻关资助项目(BA517A04 和 2007BAC03A10)

收稿日期: 2007-01-22; 修订日期: 2008-05-04

作者简介: 杨文斌(1959~), 男, 内蒙古人, 博士, 研究员. 主要从事生态学研究与沙漠化防治. E-mail: nmlkyywb@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: luqi@caf.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by 30360089, 30660155, G2000048705 and BA517A04

Received date: 2007-01-22; **Accepted date:** 2008-05-04

Biography: YANG Wen-Bin, Ph. D., Professor, mainly engaged in ecology and prevention of desertification. E-mail: nmlkyywb@163.com

wind erosion occurred in the equal-spacing and random shrub communities within 8min and 3min, respectively, of the treatment. When wind speed was increased to 15m/s, light degree of wind erosion and sand accumulation occurred in the belt shrub community, and steady "concave" sand surface developed after 30min, with the maximum loss and accumulation at 0.4cm and 0.7cm, respectively. Moreover, the wind-driven sand flow was not formed in the belt shrub community after 30min; whilst strong wind-driven sand flows were formed in the equal-spacing and random shrub communities, with as much as 65.57% and 66.96% sand being blown off after 30min. Wind erosion in the equal-spacing shrub community mainly occurred in the free space between plants; whereas in the random shrub community, the space with distant plant distribution suffered from wind erosion and that of the packed plant distribution accumulated sand, forming a complex pattern of sand surface.

Key Words: thin cover; scheme; belt; shape of san

低覆盖度植被是我国干旱、半干旱区沙地广泛分布的植被类型,覆盖度一般在 10% ~ 30% 之间^[1~3]。前人研究认为:植被覆盖度低于 40%,不能完全固定流沙和阻止风沙流的形成^[4~6],只能形成半固定、半流动沙地^[7,8]。但在实际观察中发现,当覆盖度低于 40% 时,灌丛在水平空间分布格局的差异,严重影响低覆盖度植被的防风效果^[9~15],而行带式配置格局能够很好地固定流沙,在其宽的带间形成稳定的凹月形沙面;在点格局的研究中,基本上把种群的空间分布确定为 3 种类型:随机分布(random distribution)、均匀分布(regular distribution)和集群分布(clumped distribution)^[16],行带式格局是一种特殊的集群分布。关于低覆盖度不同分布格局的防风效果已经在风洞内进行了模拟试验,行带式的防风效果显著高于等株行距均匀分布和随机不规则分布格局,并模拟出了 3 种水平空间分布格局的风力流场结构^[17~20]。本文进一步针对覆盖度在 18% ~ 20% 的不同分布格局灌木群丛,在风洞内研究行带式、等株行距均匀分布和随机不规则等 3 种水平空间分布格局的蚀积变化规律、形成风沙流的机理和固沙效果。探讨低覆盖度固沙林能够完全固定流沙的基本原理,为我国建立低覆盖度高固沙效果的人工固沙植被提供科学依据。

1 研究材料与方法

1.1 实验仪器

试验在沙漠与沙漠化重点实验室野外土壤风蚀风洞中进行的,风洞全长为 37.78m,试验段长 21m,截面为 1.2m × 1.2m。采用防沙风速廓线皮托管自动记录风速。

1.2 实验模型

以单株灌木株高 1.4 ~ 1.6m、冠幅 1.4m × 1.4m 为原形,本实验模型实物比为 1:20,模拟温度为 22℃,气压为 873hPa。采用现采的活植物(沙蒿)枝条制成类似灌木冠幅的样株,其中模型株高 7 ~ 8cm,冠幅 7cm;按照覆盖度为 20%,布设成行列式配置为 5cm × 40cm;等株行距规则配置为 15cm × 15cm 和随机不规则分布 3 种格局;随机配置的设了单株的、2 株组成 1 丛的、3 株和 4 株组成 1 丛的等等。制作好植被分布格局模型。

1.3 实验设计

在制作好植被分布格局模型放入风洞中,从模式迎风方向第一带(或株)前 20cm 处开始到模式后 10cm 的范围内,均匀平铺 2cm 厚的风成沙(风成沙来自沙坡头实验站附近的沙丘上)。制作成风洞内的风沙观测场。

1.4 实验观测

5m/s 为裸露沙地起沙风,本试验在 7、10、15m/s 3 种实验风速下,分别对 3 种植被配置格局的风沙观测场进行吹蚀 10、20、30min,同时测定模式内平铺沙面的变化状况,测定精度为 1mm,平均每平方厘米 1 个测点,变化剧烈的位置,每平方厘米 3 ~ 4 个测点,并在风沙观测场背风方向距沙缘 25cm 处中部安装一集沙仪,测定形成风沙流的强度,集沙仪分 10 层,每层高 2cm。

1.5 数据采集及制图

模拟温度为 20 ~ 22℃, 气压为 873hPa。判定流体运动状态的准则(雷诺数)用下式表示:

$$Re = \frac{\rho v l}{\mu}$$

式中, Re 为雷诺数, $\rho = 1.176 \text{ kg/m}^3$ 为空气密度, l 为物体或对比空间的线性尺度, v 为风速, $\mu = 1.862 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 为空气的动力粘滞系数。由此算出的雷诺数是: 当试验风速为 7m/s 时, 为 33157.89; 当试验风速为 10m/s 时, 为 47368.42; 当试验风速为 15m/s 时, 为 71052.63。这说明本实验近地面层气流为湍流。

在设定的 7、10、15 m/s 三种试验风速条件下, 采集地表蚀积变化资料, 用 sufer7.0 进行制图和试验结果分析。

2 结果及其分析

2.1 行带式配置格局的吹沙结果

2.1.1 低实验风速

行列式配置模式在实验风速 7m/s 和 10m/s 下吹时 30min 后沙面没变化, 说明没有蚀积发生。

2.1.2 高实验风速

在实验风速为 15m/s 时, 行列式配置模式内大约吹风 2min 开始出现风蚀现象。吹风 10、20min 和 30min 后的蚀积状况见图 1 所示, 图中在 x 轴 10cm 处有 1 林带, 以后每隔 40cm 有 1 林带, 共 3 带。图 1a 是行列式配置吹风 10min 的结果: 从图中可看出行列式配置模式的风蚀规律是首先在第 1 林带前发生风蚀, 在第 1 林带及其背风面出现积沙, 大约在 5min 后, 带前风蚀的沙开始在第 2 林带前发生堆积, 同时, 在第 1 带和第 2 带之间的中央部位开始出现风蚀。

随着吹风时间的延长, 第 2 林带前的堆积向后推移在第 2 林带处或第 2 林带后发生堆积, 且第 1 林带前的堆积的沙开始出现风蚀, 沙面高度降低, 第 2 林带及其背风面的积沙量增加, 沙面高度增高, 在 20min 后, 形成图 1b 的沙面形态。

随着延长吹风时间, 风蚀量和积沙量已经很小, 基本形成了稳定的沙面, 在 30min 后, 形成图 1c 的沙面形态, 最大风蚀深度约 0.4cm, 最大积沙厚度约 0.7cm, 在第 3 林带附近基本没有风蚀现象, 有非常微小的积沙量, 没有沙被吹出模式以外。

2.2 等株行距配置格局的吹沙结果

2.2.1 低实验风速

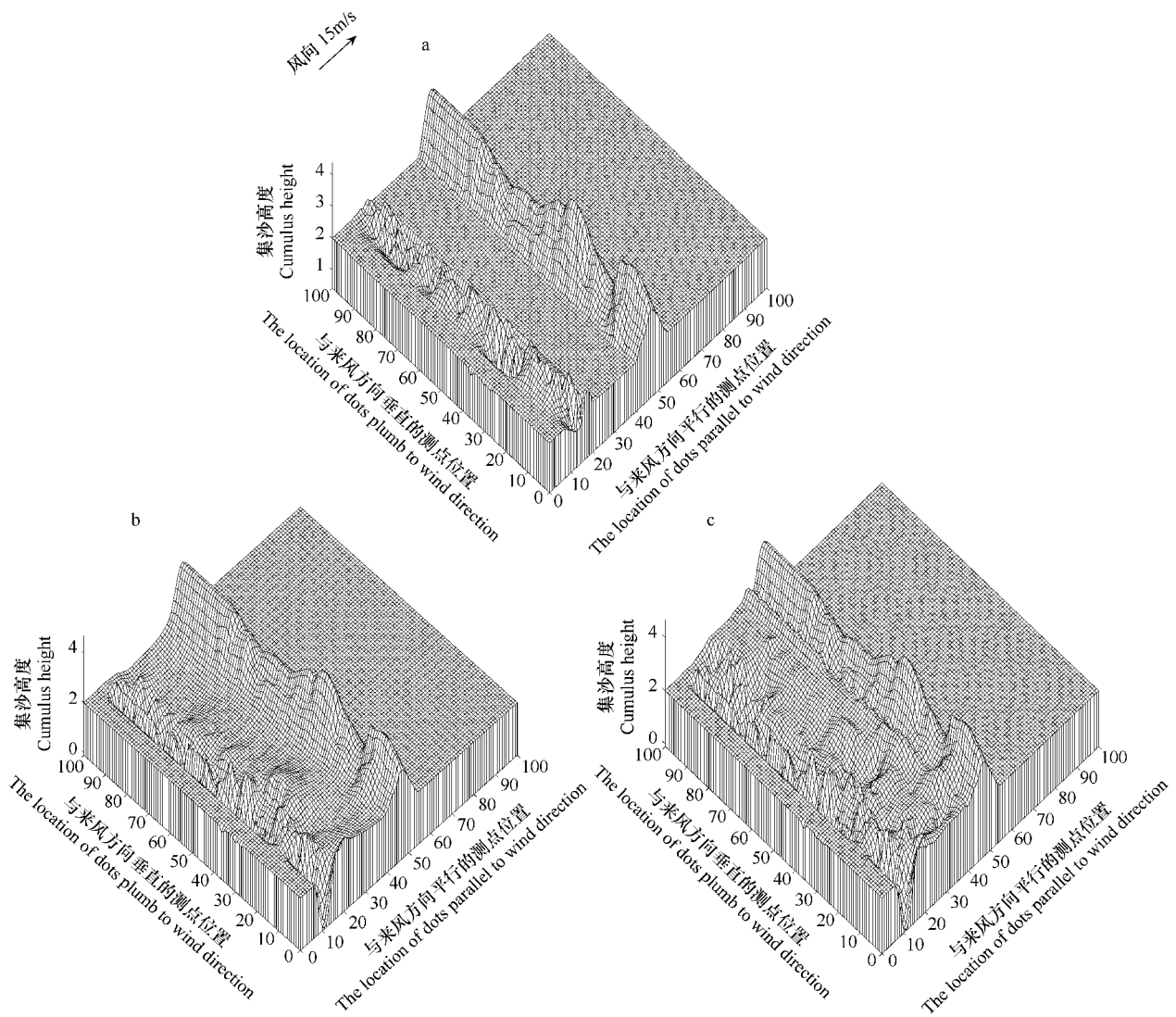
等株行距配置模式在 7m/s 实验风速下吹时 30min 后沙面没变化。

在 10m/s 实验风速下吹风时 8min 出现风蚀, 吹时 10min 变化不太明显, 最大风蚀深度约 0.2cm, 最大积沙厚度约 0.5cm, 分别出现在第 1 行灌丛的第四株灌丛的两侧和第 2 行灌丛的第 3 株背风侧; 吹风时 20min 和 30min 后的沙面变化如图 2 所示, 图中在 x 轴 10cm 轴线上每隔 15cm 设一灌丛, 共 6 株; 在 25cm 的轴线上设了 7 株与第 1 排灌丛形成“品”字型配置的灌丛, 以后循环此两种设置, 共 6 行, 即 39 株灌丛。吹时 20min 蚀积主要发生在前两排灌丛的左右两侧, 最大风蚀深度约 1.0cm, 最大积沙厚度约 1.0cm, 形成图 2a 的沙面形状。

随着吹风时间的延长, 风蚀面积扩大, 第 1 行和第 2 行的灌丛两侧基本上都出现风蚀, 风蚀深度增加, 而风蚀的沙量主要在第 3 行和第 5 行的灌丛的背风侧堆积, 到 30min 后形成图 2b 的沙面形状。最大风蚀深度 1.4cm, 最大积沙厚度 1.2cm。

2.2.2 高实验风速

在 15m/s 实验风速下吹风 10min、20min 和 30min 后的变化见图 3。大约吹风 2min 开始在第一行灌丛的两侧出现风蚀现象; 而且风蚀面很快扩展到前 3 行的所有灌丛, 被风蚀的沙量在第 3、第 4 行堆积, 并且已经有沙被吹出模式, 到 10min 时, 形成图 3a 的沙面形状, 风蚀深度达到 2cm 的面积为 14%, 积沙最大厚度为 2.6 cm。



Annotate: x and y axes are observation dots. z axis is cumulus height. Orientation of wind plumb y axis.

图1 行列式配置在 15m/s 风速下不同吹时时间的沙面蚀积状况

Fig. 1 Erosion and piling of Sand surface on belt scheme in different blowing time (15m/s)

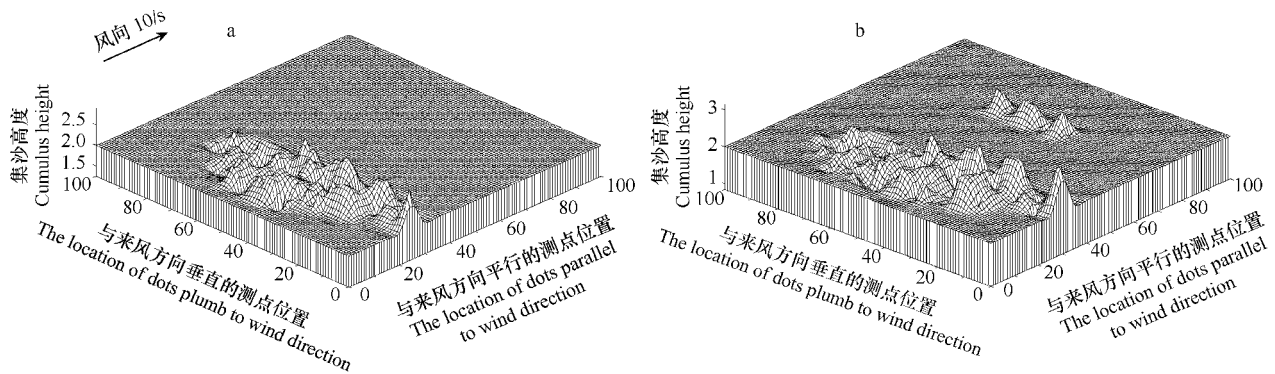


图2 等株行距配置在 10m/s 风速下不同吹时时间的沙面蚀积状况

Fig. 2 Erosion and piling of sand surface on three multiplied by three in different blowing time (10m/s)

随着吹风时间的延长,风蚀面积增加,堆积面积减小,积沙厚度增加,到 20min 时,形成图 3b 的沙面形状,

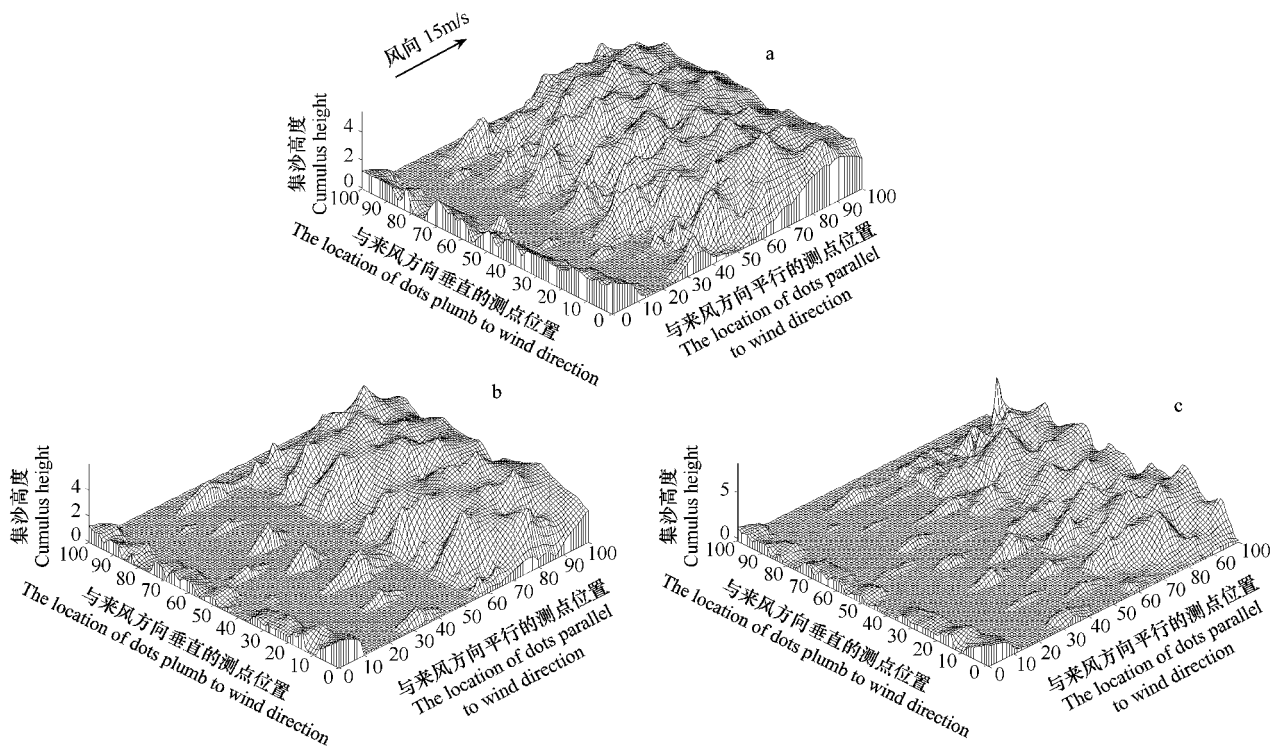


图3 等株行距配置 15m/s 风速下不同吹时时间的沙面蚀积状况
Fig. 3 Erosion and piling of sand surface on three multiplied by three in different blowing time (15m/s)

风蚀深度达到 2cm 的面积为 25%，第 1 行附近的沙基本全部被吹走，第 2 行仅在灌丛背风侧有少量沙未被吹走，积沙最大厚度为 2.0cm。

继续延长吹风时间，风蚀面积进一步增加，堆积面积减小，积沙厚度增加，到 30 min 时，形成图 3c 的沙面形状，风蚀深度达到 2cm 的面积为 38%，第 1 行和第 2 行附近的沙基本全部被吹走，第 3 行仅在灌丛背风侧有少量沙未被吹走，积沙最大厚度为 2.2cm。

2.3 随机不均匀配置格局的吹沙结果

2.3.1 低实验风速

随机配置模式在 7m/s 实验风速下吹时 30min 后沙面没变化。

在 10m/s 实验风速下吹风 10、20min 和 30min 的沙面变化情况见图 4，图中灌丛的位置见表 1。在随机配置模式内吹时 3min 出现风蚀，首先从灌丛分布最大的空隙间的的地方开始发生风蚀，吹风 10min 后形成图 4a 的沙面形状，除在灌丛稀少的空间出现风蚀外，其余部位基本没变化，最大风蚀深度为 0.9cm，最大积沙厚为 0.6cm。

表 1 随机配置灌丛的坐标
Table 1 The coordinates of randsom scheme shrub

x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)	x (cm)	y (cm)
10	8	50	33	80	63
10	13	0	88	60	73
40	8	100	0	60	78
80	8	60	48	55	75.5
85	8	100	52	15	80.5
25	20.5	10	58	15	85.5
25	25.5	10	63	50	88
60	18	37.5	55.5	85	78
60	23	42.5	55.5	90	88
55	20.5	37.5	60.5	25	3
85	23	42.5	60.5	72	5
85	28	100	76	36	92
90	25.5	85	63	2	32

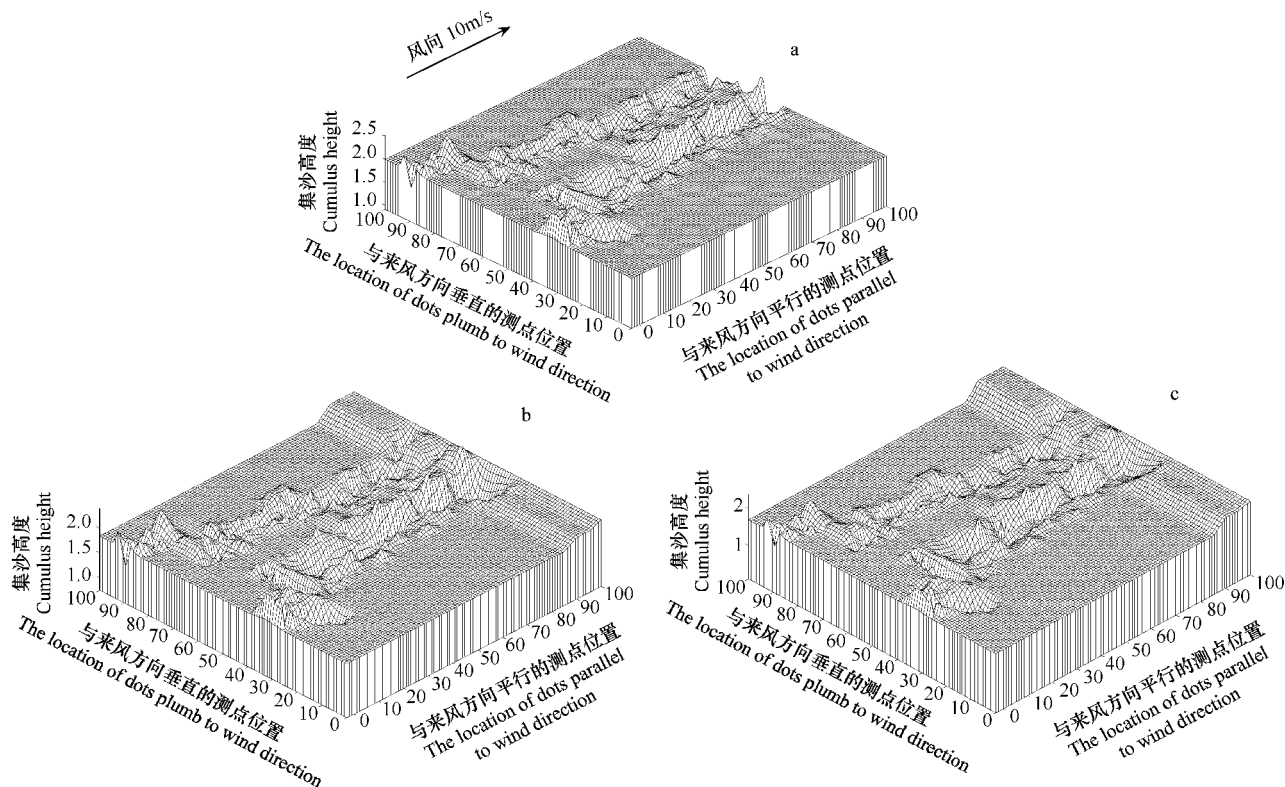


图4 随机配置在 10m/s 风速下不同吹时时间的沙面蚀积状况

Fig. 4 Erosion and piling of sand surface on random scheme in different blowing time (10m/s)

随着吹风时间延长,风蚀深度进一步增加,积沙厚度增加,到 20min 时,形成图 4b 的沙面形状,与吹风 10min 的沙面形状基本相似,风蚀最大深度增大达到 1.25cm,积沙最大厚度为 0.45cm。

继续延长吹风时间到 30min 后,形成图 4c 的沙面形状,沙面整体形状基本未发生变化,起伏程度加大,风蚀最大深度增大达到 2.0cm,积沙最大厚度为 0.65cm。

随机配置模式在 10m/s 实验风速下,风蚀发生的规律是在灌丛稀少的地方明显出现两条风蚀沟,随着吹风时时间的增加,风蚀沟在逐渐加深加宽,其它地方的风蚀也在普遍增加,堆积在普遍减少。

2.3.2 高实验风速

当实验风速为 15m/s 时随机配置模式吹风时 10、20min 和 30min 后的蚀积状况(图 5)。大约吹风 40s 就开始在灌丛分布的较大空隙间出现风蚀现象;随着吹风时间的延长,首先大空隙间的沙被严重风蚀,而在灌丛背风侧出现积沙,且越在灌丛相对集中的地方积沙越多,到 10min 后,形成如图 5a 的沙面非常复杂形状,风蚀深度达到 2cm 的面积为 18%,积沙最大厚度为 3.0cm,并且已经有沙被吹出模式之外。

随着吹风时间延长,灌丛没有分布或分布稀疏的空阔区域被进一步风蚀,而在灌丛相对集中区域的背风侧进一步积沙,到 20min 后,形成如图 5b 的沙面形状,风蚀深度达到 2cm 的面积达到 29%,积沙最大厚度为 2.5cm。

继续延长吹风时间,模式内的空阔区域被进一步风蚀,出现风蚀的面积进一步扩大,而在灌丛相对集中区域的背风侧的积沙也被部分风蚀,到 30min 后,形成如图 5c 的沙面形状,风蚀深度达到 2cm 的面积达到 40%,积沙最大厚度为 2.5cm。

2.4 3 种配置模式的固沙效益分析

不同配置模式的风蚀时间和风蚀量见表 2。

分析表 2 可得出,在 7m/s 实验风速下 3 种配置吹风时 30min 后均没有出现风蚀;当实验风速增加到 10m/s 时,行带式配置吹风 30min 后仍然没有出现风蚀,但 3×3 配置吹风 8min 就出现了风蚀,随机配置吹风

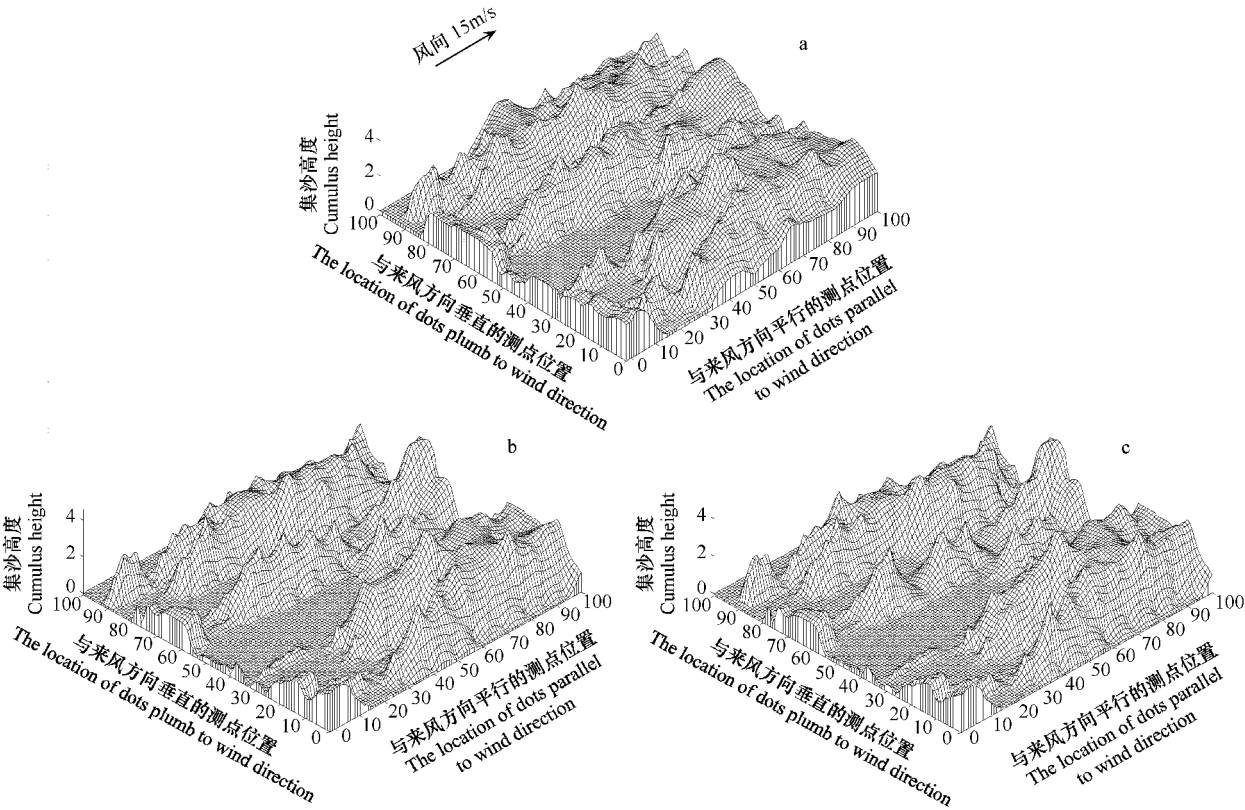


图5 随机配置 15m/s 风速下不同吹时时间的沙面蚀积状况

Fig. 5 Erosion and piling of sand surface on random scheme in different blowing time (15m/s)

3min 就出现了风蚀;当实验风速达到 15m/s 时,3 种配置均出现了风蚀,出现风蚀的时间分别为 2、1min 和 40s。这些说明随着实验风速的增加,风蚀越易发生;比较 3 种配置在不同实验风速下出现的风蚀时间说明行列式配置格局是最不易风蚀,等株行距次之,随机配置的最易风蚀。

表 2 不同配置模式的风蚀时间和风蚀量

Table 2 Time and mass of wind erosion on different scheme

实验风速(m/s) Wind speed	指标 Index	配置形式 Scheme		
		行列式 Belt	3m×3m	随机 Random
7	T	—	—	—
	Q _q (kg)	42.4	45.3	44.65
	Q _h (kg)	42.4	45.3	44.65
	Q _c (kg)	0	0	0
10	T	—	8min	3min
	Q _q (kg)	42.4	45.3	44.65
	Q _h (kg)	42.4	43.65	40.2
	Q _c (kg)	0	1.65	4.45
15	T	2min	1min	40s
	Q _q (kg)	42.4	44	44.95
	Q _h (kg)	42.4	15.15	14.85
	Q _c (kg)	0	28.85	30.1

分析 3 种配置在不同实验风速下的风蚀量,当在实验风速为 7m/s 时,3 种配置均没有风蚀;当实验风速增到 10m/s 时,行带式配置没有发生风蚀,等株行距配置和随机配置出现了风蚀,其风蚀量分别是 1.65kg 和

4.45kg,即风蚀了 3.78% 和 9.97%,随机配置的较等株行距配置的多 6.19%;当实验风速达到 15m/s 时,3 种配置均发生了风蚀,但行带式配置的沙子没有被吹跑,只是将前面的风蚀推移到了后面产生了堆积,等株行距配置和随机配置的风蚀量分别是 28.85kg 和 30.1kg,即风蚀了 65.57% 和 66.96%,随机配置的和等株行距配置风蚀量的差异不大(只多了 1.39%),这说明等株行距配置的固沙效益在 15m/s 以上实验风速时与随机配置的差不多。随着实验风速的增加,3 种配置的风蚀均在增加,实验风速在 15m/s 时,等株行距和随机配置分别较 10m/s 时增加了 61.79% 和 56.99%。

3 种配置模式的输沙量见表 3。由于行列式配置在 3 种实验风速下和其余两种配置在 7m/s 实验风速下均没有输沙量,因此在表 3 中没有列入。从表 3 中可看出当实验风速是 10m/s 时,3m×3m 配置和随机配置的输沙量均随高度的增加而减小。而当实验风速增加到 15m/s 时,3m×3m 配置吹时 10min 后输沙量从高度 20mm 到 80mm 是增加的,80mm 以上是逐渐减小的,吹时 20min 后是随着高度的增加在逐渐减小,吹时 30min 后 40mm 高度上输沙量最大,以上逐渐减小;随机配置的输沙量均在 40mm 高度上最大,以上逐渐减小。进一步分析,随机配置的输沙量均比 3m×3m 配置的高,且随实验风速的增加而增加。

表 3 两种配置的输沙量
Table 3 The sediment runoff of two scheme

高度 Height (mm)	集沙量 Piling sand(g)											
	10m/s						15m/s					
	3×3			随机 Random			3×3			随机 Random		
	10min	20min	30min	10min	20min	30min	10min	20min	30min	10min	20min	30min
200	0.005	0.019	0.001	0.004	0.002	0	1.02	0.34	0.076	1.068	0.405	0.073
180	0.003	0	0.009	0.009	0.007	0.007	1.867	0.696	0.118	1.783	0.609	0.155
160	0.002	0.001	0.008	0.022	0.034	0.018	2.914	1.186	0.232	2.737	0.942	0.231
140	0.002	0.004	0.007	0.03	0.048	0.032	4.403	2.019	0.369	4.282	1.506	0.389
120	0.002	0.01	0.016	0.097	0.108	0.071	6.264	3.161	0.679	6.367	2.398	0.646
100	0.002	0.016	0.024	0.181	0.232	0.154	8.163	4.729	1.365	9.764	4.032	1.09
80	0.007	0.018	0.043	0.333	0.451	0.343	9.223	6.4	3.076	13.924	7.252	2.033
60	0.039	0.027	0.051	0.604	0.935	0.834	8.416	7.515	6.96	17.66	16.314	5.245
40	0.08	0.039	0.074	1.455	2.756	2.997	8.242	8.177	16.378	27.858	28.24	16.243
20	0.08	0.077	0.15	3.812	5.628	4.821	7.84	9.441	14.467	15.811	7.366	6.005

3 结论与讨论

在干旱、半干旱区,风是地表侵蚀的最主要的营力,而能够保护地表免受风力侵蚀并对风力起到阻碍作用的主要是植被^[21],当植被覆盖度小于 40% 时,特别是在 20% 左右时,行带式配置格局具有显著的降低风速的作用,等株行距配置格局对风力的阻碍作用显著降低,而随机配置格局则局部有抬升风速的现象,这种相同覆盖度对风力的不同作用,表现在防止风蚀和固定流沙方面则为:

(1)3 种配置灌丛模型的防风蚀作用:当试验风速为 7m/s 时,吹时 30min 后 3 种配置格局均没有出现风蚀现象,说明低覆盖度植被在低风速时具有防止风蚀的作用。当试验风速为 10m/s 时,行带式配置格局吹时 30min 未出现风蚀现象,而等株行距配置和随机配置模式内分别在 8min 和 3min 出现风蚀;且等株行距配置和随机配置模式已经分别有占模式内总沙量的 3.78% 和 9.97% 形成风沙流而漂出模式。当试验风速增大为 15m/s 时,行带式配置、等株行距配置和随机配置模式内分别在 2min、1min 和 40s 出现风蚀;且等株行距配置和随机配置模式吹风 30min 后,风蚀深度达到 2cm 的面积已经分别超过 38% 和 40%,占模式内总沙量的 65.57% 和 66.96% 的沙形成风沙流而漂出模式。

(2)3 种配置模式的风蚀规律:行带式配置模式先在林带前发生风蚀,随着吹风时间延长^[15],在林带处或林带后发生堆积,即沙子越过林带而后移的过程,吹时 30min 后在带间形成稳定的凹月形沙面,最大风蚀深度 0.4cm,最大积沙厚度 0.7cm;等株行距配置是从第 1 行中部灌丛株间开始风蚀,随着吹风时间延长,风蚀区逐

步扩大到第 1 行、第 2 行,再到第 3 行的灌丛株间空隙,风蚀面相对均匀;随机配置是从灌丛分布的大空隙间开始风蚀,随着吹风时间延长,风蚀区逐步向小空隙间扩展,在灌丛相对集中的部位积沙,因此形成非常复杂的沙面形状。

(3)在 3 种试验风速下,行带式配置格局均表现出显著的控制风蚀、固定流沙的效果,完全控制了风沙流的形成,而等株行距配置和随机配置只能处于半固定-半流动状态^[22,23],并形成强的风沙流,模式内的沙被大量吹走。因此,能够提高生物生产力和具有较强生物群体组合^[24~26]的行带式配置格局是非常优秀的低覆盖度固沙植被模式。

References:

- [1] Wu Z Y. Chinese Vegetation. Beijing: Science Press, 1980. 956—979.
- [2] Qiu M X. Vegetation in Chinese middle desert. Lanzhou: Gansu Civilization Press, 2000.
- [3] Han D R, Yang W B, *et al.* The water dynamic relation and application of shrub or arbor in arid and semiarid sandy land. Beijing: Chinese Science and Technology Press, 1994. 34—56.
- [4] Zhu Z D, Liu S. Desertification process and harnessing in north, China. Beijing: Chinese Forestry Press, 1981. 3—7.
- [5] Zhu Z D, Chen G T. Chinese Soil Desertification. Beijing: Science Press, 1994. 14—67.
- [6] Gao S W. Control Desertification and Silvics. Beijing: Chinese Forestry Press, 1984. 34—46.
- [7] Ma S W. Study on the Structure of the Sand Blown Flow. Journal of Desert Research, 1988, 8(3): 8—22.
- [8] Dong Z B. Fifty years study of Chinese the Sand Blown Physics. Journal of Desert Research, 2005, 25(3): 293—305.
- [9] Tsoar H, Moller J T. The role of vegetation in the formation of lonear sang dunes. Aeolian Geomorphology Sympsiun, 1986. 75—95.
- [10] Wasson R J, Nanninga P M. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11(5): 505—514.
- [11] Van den Ven T A M, Fryrear D W, Spaan W S. Vegetation characteristics and soil loss by wind. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44(4): 347—349.
- [12] WolfS A, NicklingW G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion. Progress in Physical Geography, 17(1), 1993. 50—68.
- [13] Ling Y Q, Qu J J, Jin J. The effect of thin natural vegetation on the sediment runoff. Journal of Desert Research, 2003, 23(1): 12—17.
- [14] Yang W B, Wang J Y. The study of features of using water and optimizing scheme structure for man-made forest in arid and semiarid. Forestry Science, 2004, 40(5): 3—9.
- [15] Yang W B, Zhao A G, Wang J Y *et al.* The study of windbreak and sand-fixing effect about low cover level scheme structure *Artemisia halodendron* shrub. Journal of Desert Research, 2006, 26(1): 108—112.
- [16] Qu J J, Zhang W M, Wu D. Wind tunnel experiment on pyramidal sand wave. Chinese Science Bulletin, 1992, 37(20): 1870—1872.
- [17] Yang W B, Ding G D. Windbreak effects of belt scheme *Caragana korshinskii* kom plantation for sand-fixation. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12): 4106—4112.
- [18] Yang W B, Lu Q, Wu B. Wind tunnel experiment on wind structure and windbreak effect within different level scheme thin cover shrub. Journal of Desert Research, 2007, 27(3): 108—112.
- [19] Zhu Z Y, Ding G D, Yang M Y. Sand and Wind Physics. Chinese Forestry Press, 1991.
- [20] Hu M C, Zhao A G, Li N. Sand-trapping Efficiency of Railway Protective System in Shapotou Tested by Wind Tunne. Journal of Desert Research, 2002, 22(6).
- [21] Hu M C, Qu J J, Zhao A G, *et al.* System Simulation on Efficiency of Railway Protection System in Shapotou. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12(2).
- [22] Yang W B, *et al.* The preponderance and benefit analysis of “two-row- and-one-belt” poplar high productivity forest. Forestry Science and Technology, Inner Mongolia, 1997, (3): 5—9.
- [23] Yang W B, Wang J Y, Wang X J, *et al.* Relation between growth of high-yield poplar and density and planting composition in Keerqin sandy land. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(4): 33—38.
- [24] Yang W B, Ren J P. Control desertification mode of agriculture, forestry and stock compound rotating. Journal of Desert Research, 1998, 18(supplement 1): 113—115.
- [25] Feng-Rui Li, Hua Zhang, Li-Ya Zhao, *et al.* Pedoecological effects of a sand-fixing poplar (*Populus simonii* Carr.) forest in a desertified sandy land of Inner Mongolia, China. Plant and Soil, 2003, (256): 431—442.

- [26] A. E. Mohammed, C. J. Stigter, and H. S. Adam. Wind Regimes Windward of a Shelterbelt Protecting Gravity Irrigated Crop Land from Moving Sand in the Gezira Scheme (Sudan). *Theor. Appl. Climatol*, 1999, (62): 221—231.

参考文献:

- [1] 吴征镒, 主编. 中国植被. 北京: 科学出版社, 1980. 430 ~ 650.
- [2] 丘明新, 主编. 我国沙漠中部地区植被. 兰州: 甘肃文化出版社, 2000.
- [3] 韩德如, 杨文斌, 等. 干旱半干旱区沙地灌(乔)木种水分动态关系及其应用. 北京: 中国科学技术出版社, 1994. 34 ~ 56.
- [4] 朱震达, 刘恕. 中国北方地区的沙漠化过程及其治理区划. 北京: 中国林业出版社, 1981. 3 ~ 7.
- [5] 朱震达, 陈广庭. 中国土地沙质荒漠化. 北京: 科学出版社, 1994. 14 ~ 67.
- [6] 高尚武, 主编. 治沙造林学. 北京: 中国林业出版社, 1984. 34 ~ 46.
- [7] 马世威. 风沙流结构的研究. 中国沙漠, 1988, 8(3): 8 ~ 22.
- [8] 董治宝. 中国风沙物理研究五十年. 中国沙漠, 2005, 25(3): 293 ~ 305.
- [9] 屈建军, 张伟民, 吴丹. 金字塔型沙波纹的风洞实验研究. 科学通报, 1992, 37(20): 1870 ~ 1872.
- [13] 凌裕泉, 屈建军, 金炯. 稀疏天然植被对输沙量的影响. 中国沙漠, 2003, 23(1): 12 ~ 17.
- [14] 杨文斌, 王晶莹. 干旱半干旱区人工林水分利用特征与优化配置结构研究. 林业科学, 2004, 40(5): 3 ~ 9.
- [15] 杨文斌, 赵爱国, 王晶莹, 等. 低覆盖度沙蒿群丛的水平配置结构与防风固沙效果研究. 中国沙漠, 2006, 26(1): 108 ~ 112.
- [17] 杨文斌, 丁国栋. 行带式柠条固沙林防风效果的研究. 生态学报, 2006, 26(12): 4106 ~ 4112.
- [18] 杨文斌, 卢琦, 吴波. 低覆盖度不同水平格局的灌丛内风流结构与防风效果的风洞实验. 中国沙漠, 2007, 27(3): 108 ~ 112.
- [19] 朱朝云, 丁国栋, 杨明远. 风沙物理学. 北京: 中国林业出版社, 1991.
- [20] 胡孟春, 赵爱国, 李农. 沙坡头铁路防护体系阻沙效益风洞实验研究. 中国沙漠, 2002, 22(6).
- [21] 胡孟春, 屈建军, 赵爱国, 等. 沙坡头铁路防护体系阻沙效益系统仿真研究. 应用基础与工程科学学报, 2004, 12(2).
- [22] 杨文斌, 等. “两行一带式”杨树丰产林的优势及效益分析. 内蒙古林业科技, 1997, (3): 5 ~ 9.
- [23] 杨文斌, 王晶莹, 王晓江, 等. 科尔沁沙地杨树固沙林密度、配置与林分生长过程初步研究. 北京林业大学学报, 2005, 27(4): 33 ~ 38.
- [24] 杨文斌, 任居平. 农牧林复合轮作系统治沙模式和效益分析. 中国沙漠, 1998, 18(增1): 81 ~ 92.