

沙质草地植被防风抗蚀生态效应的野外观测研究

张华^{1,2}, 李锋瑞², 伏乾科³, 吕子君⁴

(1. 辽宁师范大学城市与环境学院, 大连 116029, E-mail: zhanghua0323@sina.com; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 3. 辽宁师范大学生命科学学院, 大连 116029; 4. 北京林业大学, 北京 100083)

摘要: 采用定位实测法, 研究了科尔沁沙地沙质草地植被防风抗蚀的生态效应。结果表明: 在春季风沙活动期, 退化沙质草地不同恢复阶段的植被盖度存在很大差异, 从流动沙地的 0.3% 增至固定沙地的 16%。植被盖度的有序增加导致下垫面空气动力学粗糙度从流动沙地的 0.013 cm 增至固定沙地的 0.111 cm, 摩阻速度从 0.272 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至 0.823 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 近地表 20 cm 高度平均风速由 7.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至 3.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 侵蚀风持续时数由 2 h 降至 1 h。相应地, 0~20 cm 气流层内的总输沙量由流动沙地的 88.8 $\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$ 降至固定沙地的 1.6 $\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$ 。回归分析表明, 在退化沙质草地的恢复过程中, 植被盖度 VC 与土壤风蚀率 Q 间具有良好的指数函数关系: $Q = 3.93 + 93.66e^{-0.60VC}$ ($R^2 = 0.893$, $p < 0.0001$, $n = 40$)。

关键词: 沙质草地; 植被盖度; 地表粗糙度; 输沙量; 生态效应

中图分类号: S 812-05; X171.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2004)02-0119-06

Field Investigation on Ecological Effect of Windbreak and Soil Erosion Reduction from Sandy Grasslands

ZHANG Hua^{1,2}, LI Feng-rui², FU Qian-ke³, LÜ Zhi-jun⁴

(1. College of City and Environment, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China E-mail: zhanghua0323@sina.com; 2. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000; 3. College of Life Sciences, Liaoning Normal University, Dalian 116029; 4. Beijing Forestry University, Beijing 100083)

Abstract: Through field observation of the variation of vegetational characteristics and sand transported rate in sandy grasslands at different levels of desertification during the spring erosive period, the ecological effects of windbreak and soil erosion reduction from sandy grasslands of the Horqin Sandy Land were studied. The results showed that vegetational coverage varied obviously from 0.3% in the shifting sand land of the severe desertification to 16% in the fixed sand land of the least desertification in mid May. Increases in vegetational coverage led to a corresponding increase in surface roughness length from 0.013 cm in the shifting sand land to 0.111 cm in the fixed sand land, thus resulting in an increase in friction velocity from 0.272 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the shifting sand land to 0.823 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the fixed sand land and a decrease in mean wind speed near the surfaces from 7.0 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the shifting sand land to 3.8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ in the fixed sand land. This in turn led to a reduction in the total sand transported rate within the height of 0~20 cm from 88.8 $\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$ in the shifting sand land to 1.6 $\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$ in the fixed sand land. When the experimental data were analyzed by regressing the total sand transported rate (Q) against vegetational coverage (VC), a model of predictive regression was developed: $Q = 3.93 + 93.66e^{-0.60VC}$ ($R^2 = 0.893$, $p < 0.0001$, $n = 40$).

Key words: sandy grasslands; vegetational coverage; surface roughness length; sand transported rate; ecological effect

在沙地环境中, 植被能够有效降低风速、减轻土壤风蚀, 从而减少地表土壤细微颗粒及养分的损失^[1-2]。植被的这种防风抗蚀生态效应一直是国内外农学家、气象学家和流体力学家关注和研究的焦点^[3-11]。已有的研究表明: 植被主要通过覆盖地表、增加下垫面粗糙度和拦截运动的沙粒 3 种生态过程来缓解气流对地表的侵蚀作用^[7-9, 11]; 植被对气流的影响主要反映在地表粗糙度和摩阻速度的改变上, 因此, 这 2 个重要的空气动力学参数可有效应用于植被对风及风蚀控制效应的评估^[12-16]; 植被对风蚀的影响则直接表现在地表风蚀率的变化上, 其影响程度主要取决于植被类型及植被特征诸如盖度、高度等^[11, 17]。长期以来, 由于风蚀发生期

与植物生长期在时间上的不完全一致性, 加之风蚀过程的复杂性及野外观测难度的局限, 以往关于植被影响风蚀的研究结果多通过理论推导或风洞模拟实验而获得, 且得出了风蚀率随植被盖度的增加呈指数函数减少的重要规律^[5, 6, 11, 18], 而植被尤其是沙质草地植被防风抗蚀生态效应的野外观测研究尚不多见。本文以地处我国半干旱农牧交错带、风蚀沙漠化危害较为严重的科尔沁沙地为研究区域, 以封

收稿日期: 2003-06-07; 修订日期: 2003-09-15

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目; 中科院寒区旱区环境与工程研究所知识创新工程资助项目(210097)

作者简介: 张华(1965~), 女, 博士, 山东东明人, 主要研究领域为恢复生态学及植物生态学。

育了 5 年,正处在不同恢复阶段的退化沙质草地为研究对象,通过对各个阶段的植被特征及风沙活动特征的野外定位观测,定量分析了沙质草地植被对下垫面空气动力学参数及近地层风况、风沙流固体流量的影响,旨在探明沙质草地植被的覆盖防护效应.该研究有助于深入了解草地植被在退化沙地生态系统恢复、重建中的生态过程、地位和作用,并将为干旱、半干旱沙漠化地区林草植被的恢复和重建提供理论依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区自然概况

研究区位于科尔沁沙地中南部的奈曼旗境内.该区属温带半干旱大陆性季风气候.根据奈曼旗气象站近 40 年(1961~2000)的气象观测资料,年平均太阳总辐射 $5200 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$,年平均日照时数 2946 h,年平均气温 6.3°C ,年平均降水量 366 mm,降水主要集中在 6、7、8 月,年平均蒸发量 1935 mm,年平均风速 $3.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,全年平均风速大于土壤风蚀临界起动风速($5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)的日数近 200 d,主要出现在春季和冬季.

研究区地带性土壤为沙质栗钙土,但因长期的风蚀作用已退化为风沙土.区内沙丘、缓起伏沙地、丘间低地及冲积平原等风沙地貌类型镶嵌分布.隐域型沙地植被中的乔木层已基本消失,草本层也急剧退化^[19].沙地植被主要由灌木和小半灌木小叶锦鸡儿(*Caragana microphylla*)、黄柳(*Salix gordejvii*)、差巴嘎蒿(*Artemisia halodendron*)、冷蒿(*Artemisia frigida*),多年生草本植物扁蓿豆(*Melissitus ruthenicus*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosa*)和一年生草本植物狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)和沙米(*Agriophyllum squarrosum*)等植物种组成.

1.2 研究方法

采用空间序列代替时间序列的研究方法,在封育 5 年的缓起伏沙质草地上,选择具有典型代表性的流动沙地、半流动沙地、半固定沙地和固定沙地来表征退化沙质草地的 4 个恢复阶段,即严重沙漠化阶段、强烈发展中沙漠化阶段、正在发展中沙漠化阶段和潜在沙漠化阶段^[20],然后分别在流动、半流动、半固定和固定沙地上设置固定观测点.

(1) 风沙流结构及输沙量的观测 观测时间为 2001 年 5 月中旬、5 月中旬正值风沙活动期及草地生长初期,新萌发的植物盖度尚小,但已能对地表形

成一定的覆盖保护作用.

分别选择 5 月 15 日和 5 月 17 日 2 个典型大风日(均为西北风向)作为观测日,在每个固定观测点埋设原中科院兰州沙漠研究所研制的 20/2 型阶梯式集沙仪(3 个重复),同时收集和测定 4 个下垫面 0~20 cm 气流层内的输沙量^[21],单位是 $\text{g} \cdot (\text{h} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$.每次观测时间均为 2 h.

(2) 风速的观测 在测定风沙流结构的同时,采用 DEM-6 轻便三杯风向风速表,分别观测 4 个样点 0.2 和 2 m 高度的风速值(10 min 读数 1 次).

(3) 植被特征值的观测 采用样方法($1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$)测定各个观测点的植物种组成、盖度、密度及高度(重复 5~10 次),采用样圆法($\phi = 36.5 \text{ cm}$)测定各植物种的频度(重复 35 次).

1.3 数据分析

群落物种多样性采用广泛使用的物种丰富度和 Shannon-Wiener 指数(H')进行分析.

$$H' = - \sum P_i \ln P_i \quad (i = 1, 2, \dots, s)$$

式中, P_i 用各个植物种的 3 度重要值来代替^[22].

$$P_i = (D_i/D + C_i/C + F_i/F)/3$$

式中, D_i 、 C_i 、 F_i 分别是每一观测点调查样方中第 i 个种的平均密度、平均盖度和出现频数(亦即出现该种的样圆数); D 、 C 、 F 分别是每一观测点调查样方中的总平均密度、总平均盖度和总样圆数.

地表摩擦速度(或剪切速度) U_* 的计算公式为^[23]: $U_* = K(u_2 - u_1)/(\ln Z_2 - \ln Z_1)$. 式中的 u_1 和 u_2 分别为同一时刻 $Z_1 = 20 \text{ cm}$ 、 $Z_2 = 200 \text{ cm}$ 高度处的风速(为 2 h 内的平均风速值), K 为卡曼常数(0.41).

地表粗糙长度 Z_0 的计算公式为^[24]:

$$Z_0 = 0.016 U_*^2 / g$$

式中的 g 为重力常数($9.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$).

文中的统计学分析均使用 SPSS 10.0 for windows 软件完成.其中退化沙质草地不同恢复阶段植被特征值间的差异、不同下垫面总输沙量和各层输沙量平均值间的差异均采用单因素方差分析(ANOVA)和 LSD 法检验;植被与下垫面空气动力学参数及风况间的关系、植被与总输沙量间的关系均采用相关分析和回归分析法确定.

2 结果与分析

2.1 退化沙质草地不同恢复阶段的植被特征

表 1 和表 2 分别为植物生长初期各观测点的植

被种类组成及植被特征值.从表1可以看出,随着沙漠化的逆转,沙质草地植被物种组成数量逐渐增加,同时对群落生境具有指示作用的一些种成为不同恢复阶段的优势种或建群种.例如流动沙地上的优势种为固沙先锋植物一年生草本植物沙米和多年生根茎型植物芦苇(*Phragmites australis*);随着环境条件的改善,半流动沙地上耐沙埋的半灌木差巴嘎蒿成为群落的建群种,虫实(*Corispermum macrocarpum*)则成为群落的伴生种;在半固定沙地上,差巴嘎蒿有所衰退,但仍和虫实伴生,构成群落的优势种;在固定沙地上,差巴嘎蒿完全衰退,半灌木山竹岩黄蓍(*Hedysarum fruticosum*)和一年生草本植物狗尾草成为群落的优势种,小半灌木达乌里胡枝子(*Lespedeza davurica*)和多年生草本植物糙隐子草成为群落的伴生种.

从退化沙质草地不同恢复阶段的植被种类组成看,沙质草地从固定沙地退化到流动沙地的过程中,首先衰减或灭绝的是多年生草本植物如糙隐子草,还有一些半灌木和小半灌木如山竹岩黄蓍和达乌里胡枝子,其主要原因是由于不合理的人类活动引起的自然环境退化所造成的.

表1 退化沙质草地不同恢复阶段植被种类组成及重要值(5月中旬)
Table 1 Species composition of plant communities and their importance values in different restorative stages of degraded sandy grasslands in mid May

种类	流动沙地	半流动沙地	半固定沙地	固定沙地
芦苇 <i>Phragmites australis</i>	0.5914			
糙隐子草 <i>Cleistogenes squarrosa</i>				0.1296
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>		0.0599		0.3583
猪毛菜 <i>Salsola collina</i>		0.0464	0.2187	0.0767
沙米 <i>Agriophyllum squarrosum</i>	0.2048			
虫实 <i>Corispermum macrocarpum</i>	0.1476	0.3650	0.6598	0.1922
雾冰藜 <i>Bassia dasyphylla</i>			0.1080	0.0225
差巴嘎蒿 <i>Artemisia halodendron</i>		0.7753	0.4326	
砂蓝刺头 <i>Echinops gmelini</i>			0.0333	
地梢瓜 <i>Cynanchum thesioides</i>	0.1686	0.0852	0.0160	
扁蓿豆 <i>Melissitus ruthenicus</i>				0.0854
小叶锦鸡儿 <i>Caragana microphylla</i>			0.0206	
山竹岩黄蓍 <i>Hedysarum fruticosum</i>			0.0793	0.5603
达乌里胡枝子 <i>Lespedeza davurica</i>				0.1342
防风 <i>Saposhnikovia divaricata</i>			0.0800	0.0180

从表2看,研究区植物生长初期,退化沙质草地从流动沙地恢复到固定沙地,植物种由4种逐渐增加到9种,Shannon-Wiener指数由0.08逐渐增加到1.71.其中从半流动到半固定沙地,群落的物种多样性变化很大,种丰富度和多样性指数的增幅分别为

80%和175%,而从流动到半流动沙地,从半固定到固定沙地,种丰富度变化均不大,多样性指数则有不同程度的增加,增幅分别为538%和22%,表明半流动沙地群落的种间均匀度高于流动沙地,固定沙地则高于半固定沙地.

从表2还可以看出,植物生长初期,在退化沙质草地的恢复过程中,不同阶段的植被盖度差异都很显著.从流动沙地逆转到固定沙地,植物盖度依次增大,流动沙地的覆盖度只有0.3%,几乎呈裸露状态,到了固定沙地,植物覆盖度已达16%.植被高度除了在流动沙地和半流动沙地间有明显的差异外,在半流动和半固定沙地间,半固定和固定沙地间有一定的差异,但在生物统计学意义上则不显著.植被高度的差异主要来自群落建群种或优势种的影响,比如半流动沙地受建群种差巴嘎蒿的影响,该生境中的植被高度最大.

2.2 沙质草地植被对近地表风况和空气动力学参数的影响

通过2个大风天气下的野外观测(表3),发现在春季风沙活动期,退化沙质草地从流动沙地逆转到固定沙地,在植被盖度依次增大的过程中,地表的粗糙长度和摩阻速度都呈现出依次增大的态势,其中粗糙长度 Z_0 从流动沙地的0.013cm增至固定沙地的0.111cm,约提高了8倍;摩阻速度 U_* 从流动沙地的 $0.272\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 增至固定沙地的 $0.823\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,约提高了2倍.相应地,近地表层20cm高度的平均风速依次明显降低,侵蚀风的持续时数也有所减小,其中,近地表20cm高度平均风速由流动沙地的 $7.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 降至固定沙地的 $3.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,下降了84%;侵蚀风的持续时数由流动沙地的2h降至固定沙地的1h,下降了100%.相关分析表明(表4),在退化沙质草地的恢复过程当中,草地植被盖度VC分别与地表粗糙度 Z_0 及摩阻速度 U_* 间具有极为显著的正相关关系,分别与近地表20cm高度的平均风速 v 及近地层侵蚀风的持续时数 H 间具有极为显著的负相关关系.其中, Z_0 及 U_* 均随VC的增加呈二次函数增加, v 及 H 均随VC的增加呈二次函数降低和减少.利用植被盖度与空气动力学参数及近地层风况的最佳相关关系式可以得出,研究区风沙活动期间,当地表VC达50%时, Z_0 达最大值0.150cm,当地表VC达25%时, U_* 达最大值 $0.908\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v 达最小值 $3.5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.此外,植物平均高度与地表粗糙度间也具有显著的正相关关系($r=0.318$, $p<0.05$, $n=40$),与近地表20cm高度

表 2 退化沙质草地不同恢复阶段植被特征值

Table 2 Vegetational characteristic values in different restorative stages of degraded sandy grasslands

植被特征	流动沙地	半流动沙地	半固定沙地	固定沙地
种丰富度	4	5	9	9
Shannon- Wiener 指数	0.08 ±0.10 a	0.51 ±0.44 a	1.40 ±0.15 b	1.71 ±0.45 b
盖度/ %	0.25 ±0.25a	3.68 ±1.90b	5.99 ±1.02c	15.55 ±1.11 d
高度/ cm	2.1 ±2.2a	6.3 ±3.6b	4.0 ±1.0b	4.8 ±0.3b

同一行数据具不同字母者差异显著($p < 0.05$)

表 3 退化沙质草地不同恢复阶段地表风况、 Z_0 和 U_* 的变化特征

Table 3 Variations of wind speed, surface roughness length Z_0 and friction velocity U_* in diifferent restorative stages of degraded sandy grasslands

观测时间	地表风况及空气动力学参数	流动沙地	半流动沙地	半固定沙地	固定沙地
2001-05-15	20cm 高度平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	6.9	5.7	5.3	3.8
	侵蚀风持续时数/ min	119.4	114.0	112.2	67.8
	摩阻速度 $U_*/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.249	0.463	0.534	0.801
	粗糙长度 Z_0/cm	0.011	0.035	0.047	0.105
2001-05-17	20cm 高度平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	7.0	5.6	5.3	3.7
	侵蚀风持续时数/ min	120.0	118.2	112.8	64.2
	摩阻速度 $U_*/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0.294	0.506	0.527	0.844
	粗糙长度 Z_0/cm	0.014	0.042	0.045	0.116

表 4 植被盖度与空气动力学参数及地表风况的相关系数及最佳关系式

Table 4 Correlation coefficients and the best fitted regression equations between vegetational coverage and surface roughness length, friction velocity, mean wind speed and duration of erosive wind

地表风况及 空气动力学参数	植被盖度 VC				
	r	p	n	最佳相关关系式	
地表粗糙长度 Z_0	0.975	< 0.0001	40	$Z_0 = -0.00005 \text{ VC}^2 + 0.0052 \text{ VC} + 0.0148$	$R^2 = 0.95, \text{VC} \in (0, 55)$
摩阻速度 U_*	0.961	< 0.0001	40	$U_* = -0.0009 \text{ VC}^2 + 0.0472 \text{ VC} + 0.2908$	$R^2 = 0.94, \text{VC} \in (0, 25)$
近地表 20cm 高平均风速 v	- 0.957	< 0.0001	40	$v = 0.007 \text{ VC}^2 - 0.3063 \text{ VC} + 6.8409$	$R^2 = 0.94, \text{VC} \in (0, 22)$
侵蚀风持续时数 H	- 0.949	< 0.0001	40	$H = -0.2147 \text{ VC}^2 - 0.0049 \text{ VC} + 119.49$	$R^2 = 0.96, \text{VC} \in (0, 23)$

的平均风速间也具有显著的负相关关系($r = -0.326, p < 0.05, n = 40$) .表明在植物生长初期, 植物高度对地表空气动力学参数和贴地层风速也有较大的影响, 但不如植被盖度的影响显著.

2.3 沙质草地植被对风沙流结构及输沙量的影响

2.3.1 不同下垫面的风沙流结构特征

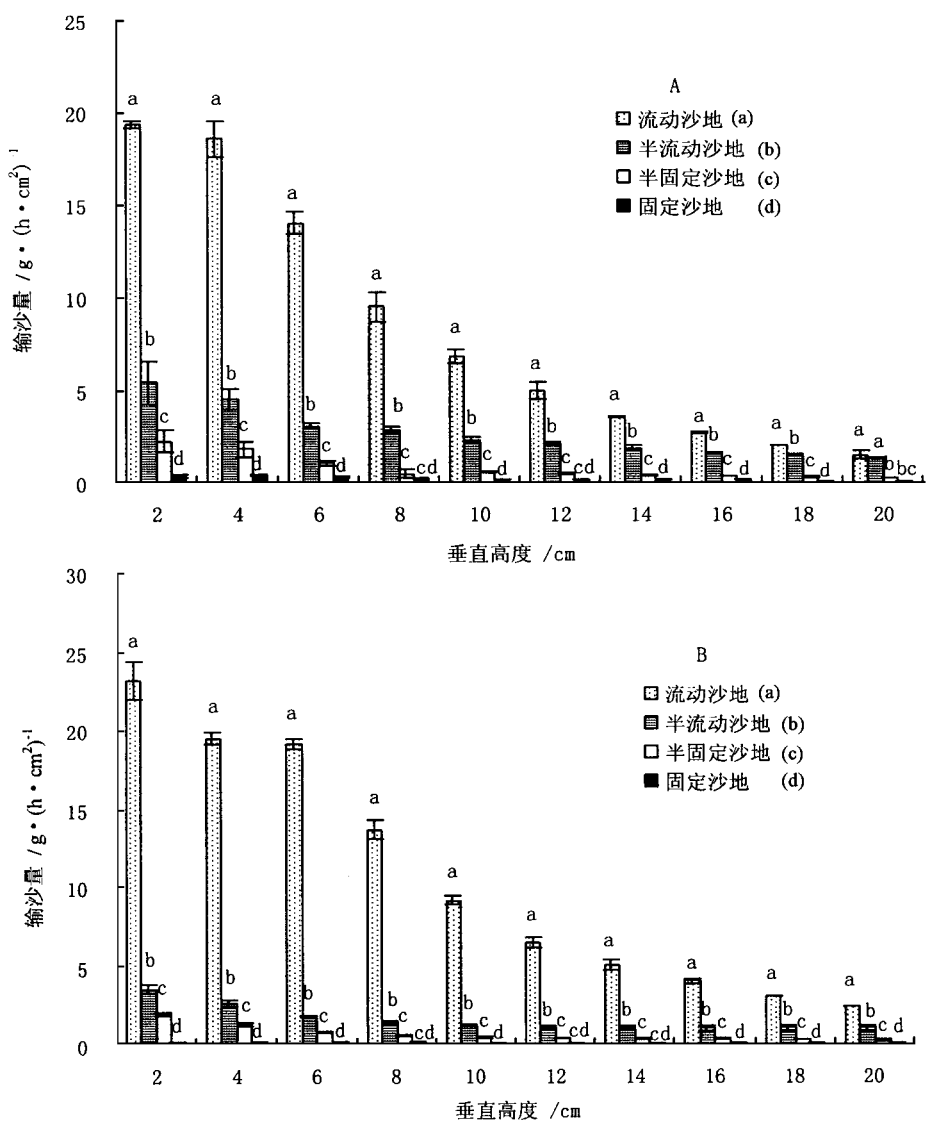
观测发现, 在同一大风天气下, 不同下垫面 0 ~ 20cm 气流层内的总输沙量之间及相同层内的输沙量之间均存在明显的差异(图 1) .流动沙地的总输沙量及各层输沙量明显高于半流动、半固定和固定沙地, 半流动沙地的总输沙量及各层输沙量又明显高于半固定和固定沙地, 半固定沙地的总输沙量及各层输沙量又明显高于固定沙地. 流动、半流动、半固定和固定沙地的总输沙量分别为 88.75、18.53、6.94 和 1.62 $\text{g}\cdot(\text{h}\cdot\text{cm}^2)^{-1}$.

观测还发现, 在同一大风天气下, 流动沙地总输沙量的 81 %、半流动沙地总输沙量的 76 %、半固定沙地总输沙量的 68 %和固定沙地总输沙量的 67 %

集中在 10 cm 以下高度范围内, 这表明植被覆盖能够有效保护地表, 从而减少了贴地层气流中的固体流量.

2.3.2 沙质草地植被盖度对输沙量的影响

输沙量是风沙流的固体流量, 主要受动力因素——风及下垫面特征如地表植被覆盖状况等因素的影响. 将 2 个大风日观测到的不同下垫面的输沙量与同期的植被盖度、风况及地表空气动力学参数进行相关分析. 结果表明, 在退化沙质草地的恢复过程当中, 草地地表 0 ~ 20cm 气流层内的输沙量 Q 分别与近地表 20cm 高度的平均风速、近地层侵蚀风的持续时数间具有极为显著的正相关关系($r = 0.527 \sim 0.840, p < 0.0001, n = 40$) ; 与同期植被盖度 VC 地表摩阻速度 U_* 及地表粗糙度 Z_0 间有极为显著的负相关关系($r = -0.695 \sim -0.795, p < 0.0001, n = 40$) .风沙活动期的输沙量 Q 与同期的植被盖度 VC 间的最佳非线性回归关系式为: $Q = 3.93 + 93.66e^{-0.60\text{VC}}$ ($R^2 = 0.893, p < 0.0001, n = 40$) ,



A 为 5 月 15 日测定数据, B 为 5 月 17 日测定数据. 具不同字母者差异显著 ($p < 0.05$). l 为 1 个标准差.

图 1 不同下垫面 0 ~ 20 cm 气流层内输沙量随垂直高度的变化特征

Fig.1 Distribution of sand transported rate over height (A and B indicate the measured data on 15 May and 17 May, respectively, means with different letters indicate significant differences at $p < 0.05$, bars represent one standard deviation)

表明风沙流的固体流量随植被盖度的增大呈指数减小(图 2). 另外, 植物生长初期, 0 ~ 20cm 气流层内

的总输沙量与植被高度也具有显著负相关关系($r = -0.441$, $p < 0.01$, $n = 40$), 表明植被高度对近地

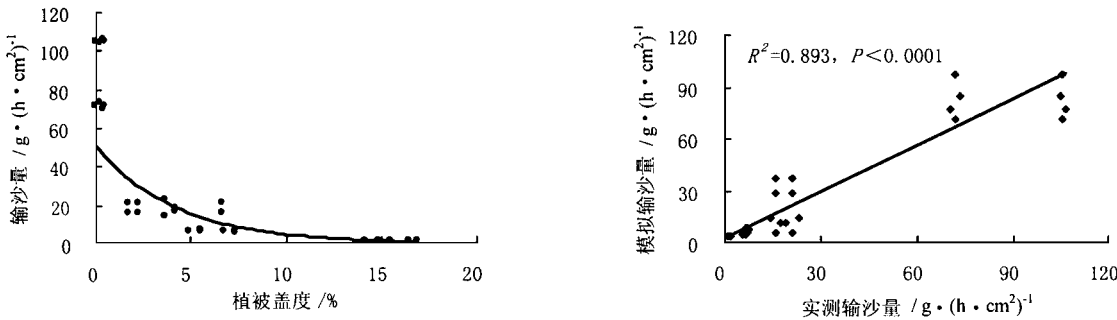


图 2 输沙量与植被盖度的关系

Fig.2 Relationship between vegetational coverage and sand transported rate

层气流层中的输沙量也有一定的影响。

3 结论与讨论

(1) 风沙活动期间,退化沙质草地从流动沙地到固定沙地的恢复过程中,植被盖度由小到大的有序变化对近地表空气动力学参数及风况的影响很大,决定系数达 0.94 以上。其中地表空气动力学粗糙度 Z_0 和摩阻速度 U 均随植物盖度的增加呈二次函数增加,近地表 20cm 高度的平均风速 v 及近地层侵蚀风的持续时数 H 均随植被盖度的增加呈二次函数降低和减少。植被高度的变化对 Z_0 和 v 也分别具有显著的正向影响和负向影响,但决定系数小于植被盖度。这一研究结果与 Bressolier 等^[17]在法国大西洋沿岸沙丘区的野外观测结果是一致的。

本研究采用野外观测数据得出的植被盖度与空气动力学粗糙度 Z_0 的回归关系,在形式上与以往风洞模拟实验得出的 Z_0 随植被盖度的增加呈幂函数增加^[11]以及 Z_0 随植被盖度的增加呈指数函数增加^[18]的结论略有不同,但都揭示了植被抑制风蚀、扼制沙漠化效应的生态机理,即植物的覆盖可以增大空气动力学粗糙度,提高摩阻速度,从而增大气流作用于地表时所遇到的阻力,缓解气流对地表的侵蚀作用,减少土壤风蚀率,最终实现对地表的保护作用。

(2) 风沙活动期间,退化沙质草地从流动沙地到固定沙地的恢复过程中,草地植被的变化引起了下垫面风沙流结构及固体流量的改变:随着植被盖度的增大,0~10cm 气流层内的输沙量占 0~20cm 层总输沙量的比率相应减小,4 个阶段的比率分别为 0.81、0.76、0.68 和 0.67。相应地,0~20cm 气流层内的总输沙量由流动沙地的 $88.8 \text{ g} \cdot (\text{h} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$ 降至固定沙地的 $1.6 \text{ g} \cdot (\text{h} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$,下降了约 55 倍。由此可见,在春季风沙活动期,固定沙地的植被盖度 (16%) 条件即可有效地控制风蚀。

该结果虽然是在植物生长初期退化沙质草地各个恢复阶段的植被盖度都还比较小 ($VC < 17\%$) 的情况下得出的,但它仍然反映了植被盖度的变化对土壤风蚀率的显著影响,且影响形式与以往的许多风洞模拟实验结果^[5, 11, 18]及理论推导结果^[6]一致。

参考文献:

- [1] Skidmore E L, Powers D H. Dry soil-aggregate stability: energy-based index[J]. Soil Sci Soc. Am. J., 1982, 46:1274 ~ 1278.
- [2] 张华,李锋瑞,张铜会,等.春季裸露沙质农田土壤风蚀量及变异特征[J].水土保持学报,2002,16(1):29~32.
- [3] Chepil W S, Woodruff N P, Siddoway F H, *et al.* Vegetative and nonvegetative materials to control wind and water erosion[J]. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 1963, 27(1):86~89.
- [4] Siddoway F H, Chepil W S, Armbrust D V. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control[J]. Trans. ASAE, 1965, 8(3):327~331.
- [5] Fryrear D W. Soil cover and wind erosion[J]. Trans. ASAE, 1985, 28(3):781~784.
- [6] Wasson R J, Nanninga P M. Estimation wind transport sand on vegetated surface[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1986, 11:505~514.
- [7] Van de Ven T A M, Fryrear D W, Spaan W P. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1989, 44:347~349.
- [8] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1993, 17(1):50~68.
- [9] Wolfe S A, Nickling W G. Shear stress partitioning in sparsely vegetated desert canopies[J]. Earth surface processes and landforms, 1996, 21:607~620.
- [10] 董光荣,李长治,金炯,等.关于土壤风蚀风洞模拟实验的某些结果[J].科学通报,1987,32(4):297~301.
- [11] 董治宝,陈渭南,董光荣,等.植被对风沙土风蚀作用的影响[J].环境科学学报,1996,16(4):442~446.
- [12] Abtew W, Gregory J M, Borrelli J. Wind profile: estimation of displacement height and aerodynamic roughness[J]. Transaction of the ASAE, 1989, 32(2):521~527.
- [13] Lee J A. Near surface wind flow around desert shrubs[J]. Physical Geography, 1991, 12(2):140~146.
- [14] 刘小平,董治宝.直立植被粗糙度和阻力分解的风洞实验研究[J].中国沙漠,2002,22(1):82~87.
- [15] 董治宝, Fryrear D W, 高尚玉.直立植物防沙粗糙特征的模拟实验[J].中国沙漠,2000,20(3):260~263.
- [16] Schwartz R C, Fryrear D W, Harris B E, *et al.* Mean flow and shear stress distributions as influenced by vegetative windbreak structure[J]. Agric. For. Meteorol., 1995, 75:1~22.
- [17] Bressolier C, Thomas Yves F. Studies on wind and plant interactions on French Atlantic coastal dunes[J]. Journal of sedimentary petrology, 1979, 47(1):331~338.
- [18] 张春来.现代风蚀荒漠化(沙漠化)动力机制若干问题研究[D].2002.48~61.
- [19] 刘新民,赵哈林.科尔沁沙地生态环境综合整治研究[M].兰州:甘肃科学技术出版社,1993.12~26.
- [20] 朱震达,刘恕.中国北方地区沙漠化过程及其治理区划[M].北京:中国林业出版社,1981.1~56.
- [21] 张华,李锋瑞,张铜会,等.科尔沁沙地不同下垫面风沙流结构及变异特征[J].水土保持学报,2002,16(2):20~23.
- [22] 常学礼,邬建国.科尔沁沙地沙漠化过程中的物种多样性[J].应用生态学报,1997,8(2):151~156.
- [23] Dong Z B, Wang X M, Zhao A G, *et al.* Aerodynamic roughness of fixed sandy beds[J]. J. Geophys. Res., 2001, 106:11001~11011.
- [24] Chamberlain A C. Roughness length of sea, sand and snow[J]. Boundary Layer Meteorol., 1983, 25:405~409.