

亢力强,李彩云,张军杰,等.柔性植株地表瞬时地表剪应力分布特征[J].中国沙漠,2020,40(5):49-56.

柔性植株地表瞬时地表剪应力分布特征

亢力强,李彩云,张军杰,邹学勇

(北京师范大学 地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室/防沙治沙教育部工程研究中心,北京 100875)

摘要: 由于风的湍流性质,风对地表剪切作用而产生的地表剪应力是瞬态变化的。本文重点研究柔性植株地表植株周围瞬时地表剪应力的分布特征,为评估植株防风蚀作用提供参考。通过风洞实验,测量了在不同植株密度和不同来流风速下细长柔性植株覆盖地表上植株周围瞬时地表剪应力的空间分布。结果表明:柔性植株地表植株两侧地表剪应力增加,植株前后地表剪应力减小;随风速的增加,地表剪应力、均方根脉动地表剪应力的空间平均值和标准偏差均增加,而地表剪应力脉动强度的空间平均值和标准偏差均减小,它们在空间上的相对标准偏差基本不受风速的影响;随植株密度的增加,地表剪应力的空间平均值和标准偏差以及均方根脉动地表剪应力的空间平均值均减小,而地表剪应力在空间上的相对标准偏差、地表剪应力脉动强度的空间平均值和标准偏差均增大。

关键词: 瞬时地表剪应力; 柔性植株; 风洞实验

文章编号: 1000-694X(2020)05-049-08

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2020.00048

中图分类号: X169

文献标志码: A

0 引言

土壤风蚀是干旱和半干旱区域经常发生的现象^[1],当风力超过沙粒或土壤颗粒的起动风速时,这些颗粒物会进入气流中,引起风沙灾害和土地退化等环境问题^[2-4]。因此,人们开始采取许多措施来抑制或防治土壤风蚀。植被可减小风速、覆盖部分地表和捕捉气流中风蚀物^[5],因而成为防治风蚀的重要措施^[6-8]。地表剪应力是风作用于地表的剪切作用产生的,当这个剪切作用变大时,地表剪应力也变大,从而风对地表的侵蚀作用也变大,即地表剪应力值较大的区域,侵蚀越严重,反之侵蚀则较弱。可见,地表剪应力空间分布状态可以反映植株覆盖地表上植株周围侵蚀强弱的空间分布状态。由于风的湍流特性,风对地表的剪切作用(即地表剪应力)会发生脉动变化,这种脉动变化不仅是对风湍流的响应,也会对风蚀产生一定影响。因此,探究地表剪应力的瞬时变化特征也具有一定研究意义。

目前大多着重于平均地表剪应力的研究,而对于地表剪应力的瞬时变化特征的研究还很不充分。在平均地表剪应力实验研究方面,测量方法主要有

3种:一是通过剪应力分解关系获得^[9],即粗糙元之间的裸露地表上的阻力等于粗糙元表面的总阻力减去粗糙元上的阻力;二是通过阻力测量法直接测量粗糙元之间的裸露地表上的阻力^[10-11];三是在地表上布置许多地表剪应力传感器测量每一点的地表剪应力,然后空间平均得到平均地表剪应力^[12-14]。通常认为平均地表剪应力随侧影盖度的增加而减小^[10-11,14],同时还受到粗糙元排列方式的影响^[9]。然而只有第三种方法才能获得地表剪应力在粗糙元周围的空间分布^[12-14]。粗糙元前后地表剪应力减小,而两侧地表剪应力增加^[13-14]。Walter等^[13]比较了方柱木块与一簇圆柱状植株粗糙元,实验结果表明植被粗糙元与刚性粗糙元对地表剪应力空间分布状态的影响明显不同,也说明了刚性粗糙元并不能很好地模拟植被的一些特性。Kang等^[14]发现细长柔性植株周围地表剪应力空间分布类型还受到植株密度的影响,而且由于植株的不对称导致地表剪应力分布也不对称。在地表剪应力瞬时变化特征研究方面,仅有Walter等^[13]报道了方柱木块与一簇圆柱状植株周围地表风速标准偏差与光滑表面的标准偏差之比的空间分布,未有地表剪应力脉动

收稿日期:2020-03-31; 改回日期:2020-05-11

资助项目:国家自然科学基金项目(41871003)

作者简介:亢力强(1976—),男,河北人,博士,研究方向为风沙物理。E-mail: kangliqiang@bnu.edu.cn

值及其脉动强度的报道。

自然界中植株通常具有多孔柔韧特征,然而现有研究大多将植株简化为诸如圆柱、方柱等刚性粗糙元模型^[9-11,15],不能模拟植株变形、枝叶摆动导致的空气动力学阻力和流动特征^[16-17],而且植株具有更大的潜力从风中吸取动量和更有效地减小风蚀^[18],因而刚性粗糙元不能对地表剪应力进行很好的模拟,结果不能直接应用到柔性植株条件。故本文采用柔性植株模型并将地表剪应力采集时间间隔缩短至0.01 s,来研究不同植株密度覆盖条件下瞬时地表剪应力的空间分布规律。

1 材料与方法

柔性塑料植株模型呈细长状,静止状态植株平均高度为9.0 cm,它不表示某个具体的实际植物,而是植物形态的概化模型,可近似为小麦、狗尾草等细长状植物。实验在北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室的中型风洞内进行,该风洞实验段长16 m,横截面积为1 m×1 m,实验段入口设置木块粗糙元来调节气流边界层,使边界层厚度可达到30 cm。铺设在风洞内的植株区域长约8 m、宽1 m,其前缘到风洞入口的距离为5 m,以交错排列方式进行布置(图1)。植株铺设密度为32、50、98株·m⁻²。实验来流风速设为10.8、12.2、13.6、15.1、16.5 m·s⁻¹。

瞬时地表剪应力采用研制的地表剪应力测量系统进行测量^[14],该系统由地表剪应力探头、微压



图1 风洞中的植株模型

Fig.1 Plant model in wind tunnel

差变送器、数据采集板和计算机组成。距离风洞入口约11 m处选取风洞底板中心处的一棵植株,在其周围位置均匀布置64个地表剪应力测点(图2),测量瞬时地表剪应力的空间分布,由于采集板只有32个模拟信号输入通道,所以64个测点需要分两次进行测量,每次布置32个地表剪应力探头。每个测点采样频率为100 Hz,采样时间为60 s。地表剪应力测量区域为正方形(图2),在植株密度为32、50、98株·m⁻²时对应的正方形边长分别为0.177、0.141、0.101 m。由于测点均匀分布,呈正方形网格,因而相邻测点的间距(即正方形网格边长)均相等,在3种植株密度下分别为0.025、0.02、0.014 m。植株后方测点a和侧向测点b与植株的距离相等,在3种植株密度下分别为0.018、0.014、0.01 m。

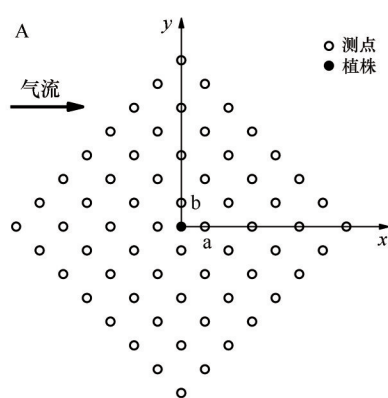


图2 植株周围测点分布

Fig.2 Measurement points around the plant

采用均方根脉动地表剪应力表示每一测点瞬时地表剪应力的波动幅度:

$$\tau_{s,rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\tau_{s,i} - \tau_{sm})^2} \quad (1)$$

式中: $\tau_{s,rms}$ 是均方根脉动地表剪应力; $\tau_{s,i}$ 是统计时间段内*i*时刻该测点的瞬时地表剪应力; τ_{sm} 是统计时间段内该测点的平均地表剪应力;*N*为瞬时地表剪应力的统计数目。

采用地表剪应力脉动强度表征每一测点瞬时地表剪应力波动的相对强弱:

$$\xi = \tau_{s, rms} / \tau_{sm} \quad (2)$$

式中: ξ 为地表剪应力脉动强度。

2 结果与分析

2.1 地表剪应力的空间分布

由于风的湍流特性, 每一测点的地表剪应力也是脉动变化的, 图3给出了在植株密度 $32 \text{ 株} \cdot \text{m}^{-2}$ 、来流风速 $13.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时植株后方测点a和侧向测点b的瞬时地表剪应力 τ_s 随时间 t 的变化序列。瞬时地表剪应力随时间的变化具有明显的波动特征, 这与气流湍流有关。靠近植株的侧向测点b的地表剪应力大于植株后方测点a的地表剪应力值, 这与气流在植株周围的绕流有关。

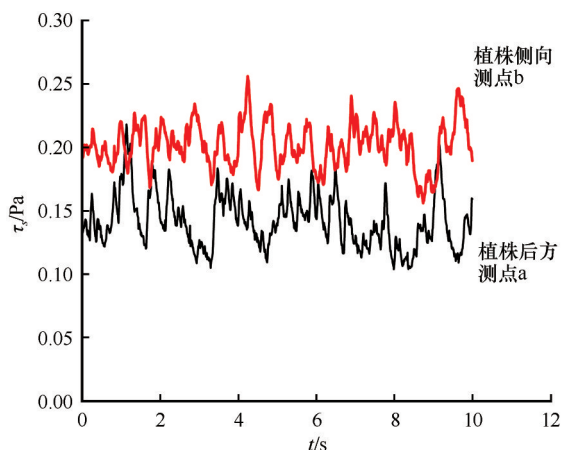


图3 瞬时地表剪应力随时间的变化

Fig.3 Variation of instantaneous surface shear stress with time

图4描述了不同植株密度和风速下植株周围地表剪应力分布情况, 植株位于(0,0)坐标处, u_{j0} 表示实验来流风速, 气流沿 x 轴正方向从左到右流动, τ_{sm} 表示每一测点瞬时地表剪应力的时间平均值。植株周围地表剪应力空间分布的基本特征为植株两侧地表剪应力增加, 植株前后地表剪应力减小。该分布特征与Walter等^[13]对方柱木块和圆柱状植株粗糙元的测量结果一致。这主要是由于气流在植株两侧加速而在植株前后减速。随着植株密度的增加, 地表剪应力有减小的趋势, 这是由于随植株密度增加, 植株分担了更多的气流阻力, 从而作用到地表的气流剪切力减小。随着来流风速的增加, 地表剪应力增加, 这是由于气流总剪切力增加, 从而

到达地面的气流剪切力也会增加。

为了定量反映地表剪应力在空间上的分布特征, 还分析了植株周围地表剪应力在空间上的平均值、标准偏差和相对标准偏差(定义为标准偏差与平均值的比值)随植株密度、来流风速的变化情况。由图5可知, 地表剪应力的空间平均值随风速的增加而增加, 随植株密度的增加而减小, 这也可以从图4反映。地表剪应力在空间上分布的标准偏差随风速的增加也增加, 随植株密度的增加出现了减小趋势, 可能原因是随风速的增加, 在植株周围的气流绕流作用增强, 导致植株周围气流大小分布更加不均匀, 从而地表剪应力空间分布也更加不均匀(即变化范围增大), 其空间上的标准偏差也会增加。随植株密度的增加, 植株对地表面的遮蔽效应增加, 导致植株周围气流分布相对均匀, 地表剪应力空间分布也相对均匀一些(即变化范围减小), 因而其空间分布上的标准偏差会减小。地表剪应力在空间上分布的相对标准偏差几乎不随风速而变化, 主要原因是地表剪应力的空间平均值和标准偏差均随风速的增加而增加, 导致其比值没有随风速显著变化, 但其随植株密度的增加而增加, 主要原因是随植株密度的增加, 地表剪应力的空间平均值减小的更快。

2.2 均方根脉动地表剪应力的空间分布

在不同植株密度下, 均方根脉动地表剪应力通常在植株前方或者后方出现较小值, 在植株两侧方向一般大概率出现较大值(图6)。这可能与地表剪应力分布或气流绕流有关, 植株两侧地表剪应力较大, 气流绕流导致气流速度较大, 速度脉动也较大, 从而地表剪应力脉动值也会较大, 但在植株前后气流受到抑制, 速度脉动减小, 导致地表剪应力脉动也较小。

从图7可以看出, 均方根脉动地表剪应力的空间平均值随风速的增加而增加, 可能原因是随风速的增加, 地表附近风速脉动也会增加, 导致地表剪应力在整个空间上的脉动增加。随植株密度的增加, 均方根脉动地表剪应力的空间平均值减小, 这是由于植株对地表面的遮蔽效应增加, 抑制了整个空间上地表剪应力的脉动。均方根脉动地表剪应力在空间上分布的标准偏差随风速的增加也增加, 原因是随风速的增加, 在植株周围的气流绕流作用

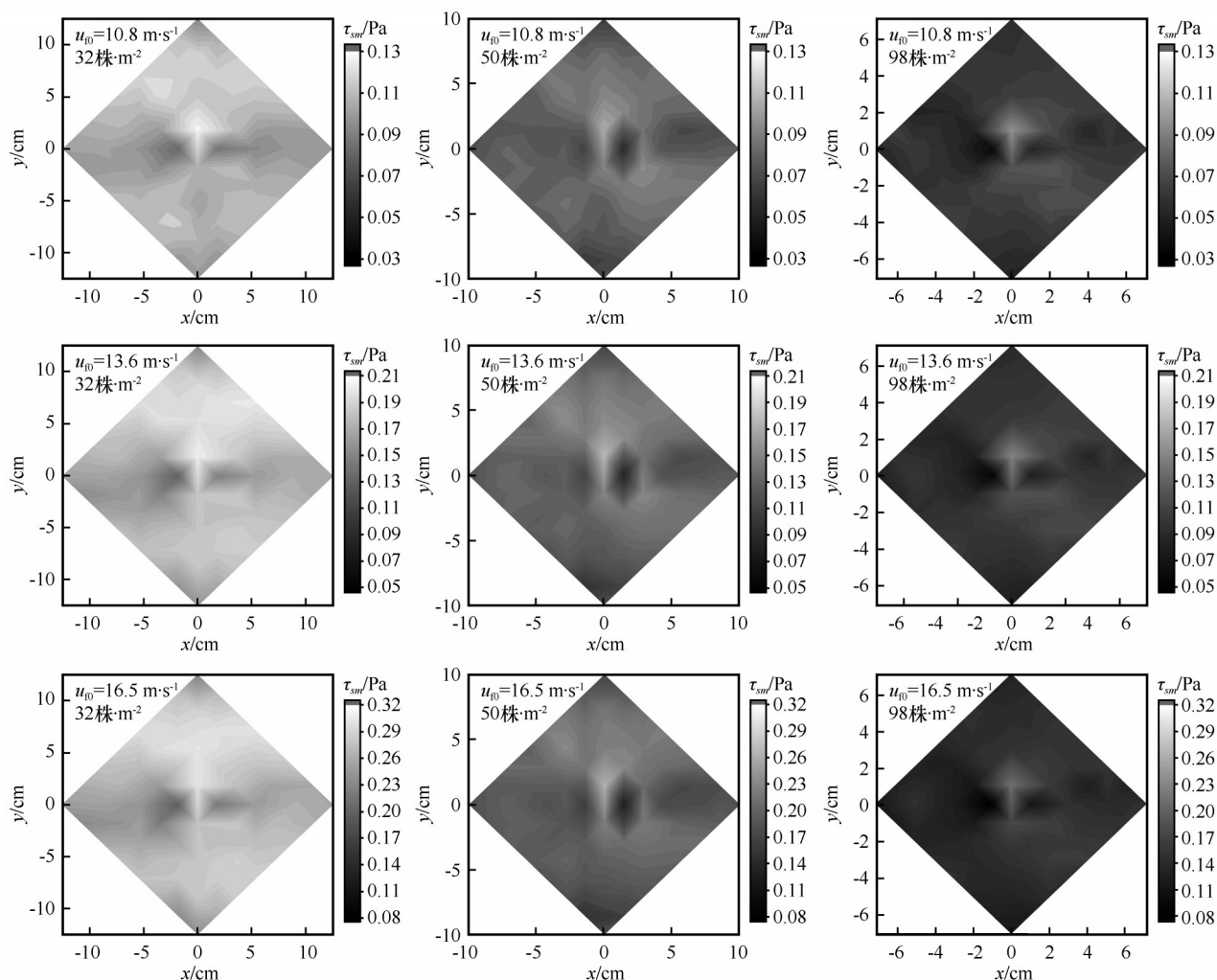


图4 不同植株密度下地表剪应力分布的比较(气流方向从左到右)

Fig.4 Comparison of surface shear stress at different plant densities (air flows from left to right)

增强,地表剪应力空间分布更加不均匀导致地表剪应力脉动的空间分布也更加不均匀(即变化范围增大),因而均方根脉动地表剪应力在空间上的标准偏差增加。均方根脉动地表剪应力在空间上分布的相对标准偏差基本不受风速的影响,主要原因是均方根脉动地表剪应力的空间平均值和标准偏差均随风速的增加而增加,导致其比值没有随风速显著变化。随植株密度的增加,均方根脉动地表剪应力在空间上的标准偏差和相对标准偏差在大多数风况下有先减小后增加的趋势。

2.3 地表剪应力脉动强度的空间分布

由图8可以看出,在不同植株密度下,地表剪应力脉动强度通常在植株后方出现增大的情况,而在紧挨植株两侧一般出现减小的情况,这可能由于地表剪应力值在植株后方减小很快,在紧挨植株两侧

增加较快。随着植株密度的增加,地表剪应力脉动强度的空间分布在整体上增加,主要由于地表剪应力空间分布整体上随植株密度的增加而减小很快导致。

由图9可以看出,地表剪应力脉动强度的空间平均值随风速的增加而减小,主要是由于随风速的增加,地表剪应力在空间上的平均值增大速度大于其均方根脉动值的增大速度。地表剪应力脉动强度的空间平均值随植株密度的增加而增加,主要是由于随植株密度的增加,地表剪应力在空间上的平均值的减小速度大于其均方根脉动值的减小速度。地表剪应力脉动强度在空间上的标准偏差随风速的增加而减小,主要是由于随风速的增加,其在空间上分布更加均匀(即变化范围减小)。随植株密度的增加,地表剪应力脉动强度在空间上的标准偏差增大,主要是由于地表剪应力脉动强度空间分布

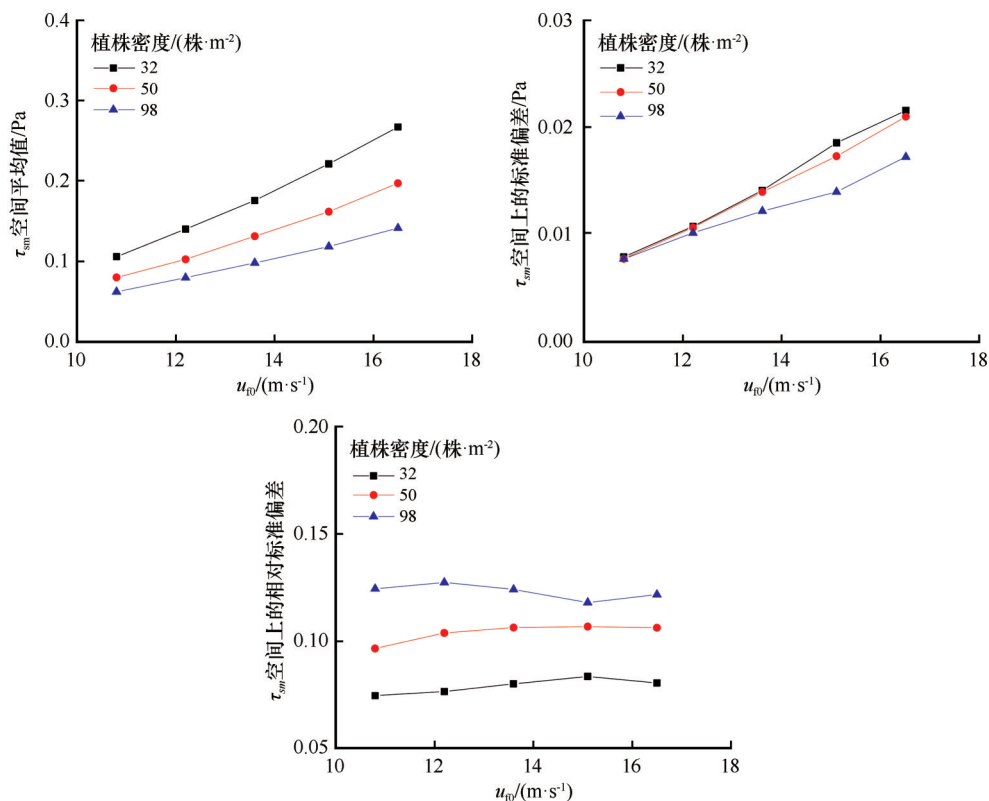


图5 地表剪应力的空间平均值、标准偏差和相对标准偏差随植株密度和来流风速的变化

Fig.5 Variation of mean value, standard deviation and relative standard deviation of surface shear stress in space with plant density and incoming wind speed

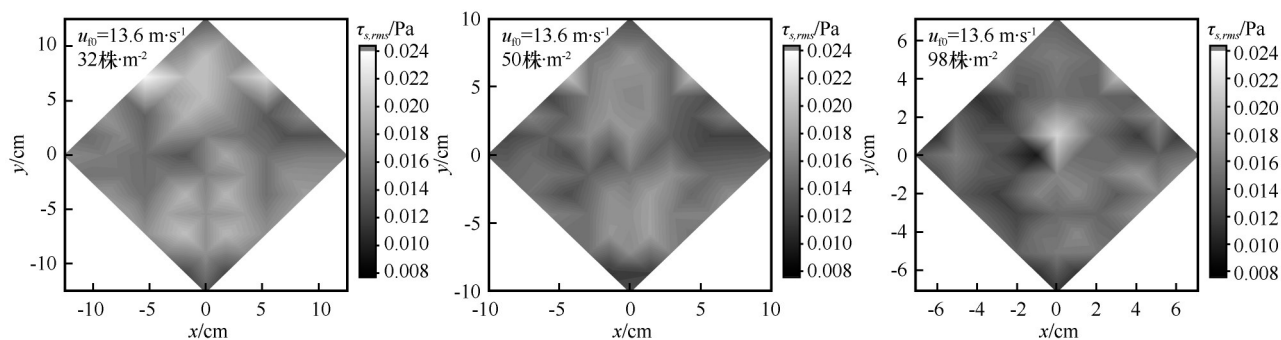


图6 均方根脉动地表剪应力的空间分布

Fig.6 Space distribution of RMS fluctuation of surface shear stress

更加不均匀所致。地表剪应力脉动强度在空间上的相对标准偏差基本不受风速的影响,随植株密度的变化没有统一的规律。

2.4 瞬时地表剪应力概率密度分布

由于每一测点的瞬时地表剪应力随时间是脉动变化的(图3),因此,它会表现出一定的概率分布类型。图10给出了在植株密度32株·m⁻²、来流风速13.6 m·s⁻¹时植株后方测点a和植株侧向测点b的瞬时地表剪应力概率密度分布,可以看出测点的瞬时地表

剪应力概率密度分布可表示为正态分布函数:

$$P(\tau_s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(\tau_s - \tau_{sm})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3)$$

式中: $P(\tau_s)$ 为瞬时地表剪应力概率密度; τ_s 为瞬时地表剪应力; τ_{sm} 为瞬时地表剪应力的时间平均值; σ 为标准偏差。

3 结论

柔性植株地表瞬时地表剪应力随时间具有明显的波动,这种波动在植株周围具有不同的分布特

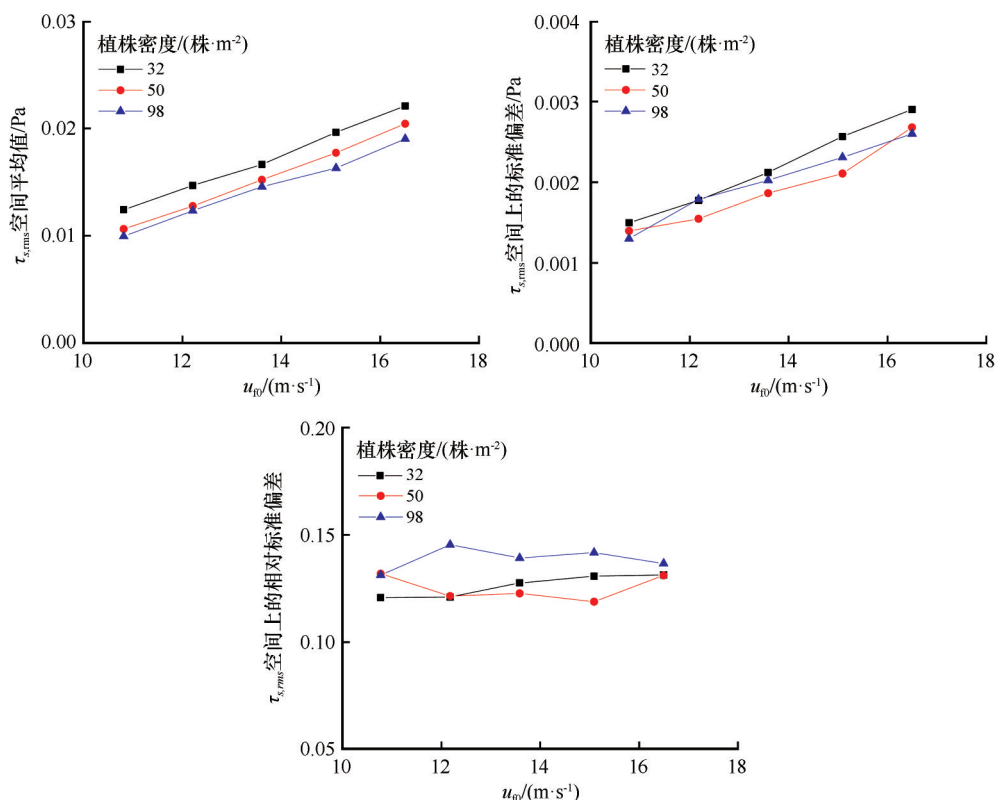


图7 均方根脉动地表剪应力的空间平均值、标准偏差和相对标准偏差随植株密度和来流风速的变化

Fig.7 Variation of mean value, standard deviation and relative standard deviation of RMS fluctuation of surface shear stress in space with plant density and incoming wind speed

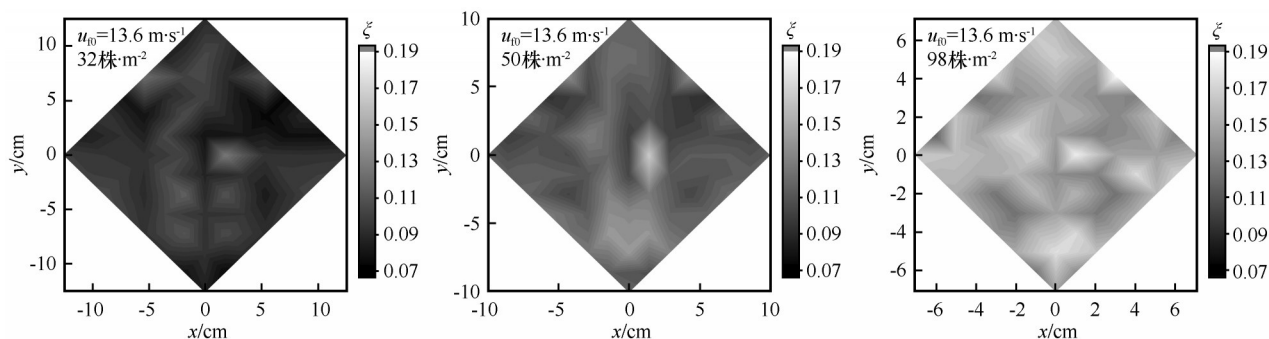


图8 地表剪应力脉动强度的空间分布

Fig.8 Space distribution of fluctuation intensity of surface shear stress

征,具体表现为:植株两侧地表剪应力增加,植株前后地表剪应力减小;均方根脉动地表剪应力通常在植株前方或者后方出现较小值,在植株两侧方向出现较大值;地表剪应力脉动强度通常在植株后方出现增大的情况,而在紧挨植株两侧出现减小的情况。这与气流在植株两侧加速而在植株前后减速有关。

植株密度和来流风速对地表剪应力、均方根脉动地表剪应力和地表剪应力脉动强度在空间分布上的平均值、标准偏差和相对标准偏差有重要影响。地表剪应力的空间平均值、标准偏差均随风速

的增加而增加,随植株密度的增加而减小,在空间上的相对标准偏差随植株密度的增加而增加,主要原因是植株密度增加导致植株分担了更多的气流阻力,从而作用到地表面的气流剪切力减小,而来流风速的增加则导致到达地面的气流剪切力增加。均方根脉动地表剪应力的空间平均值随风速的增加而增加,随植株密度的增加而减小,在空间上分布的标准偏差随风速的增加也增加。随植株密度的增加,均方根脉动地表剪应力在空间上的标准偏差和相对标准偏差在大多数风况下有先减小后增

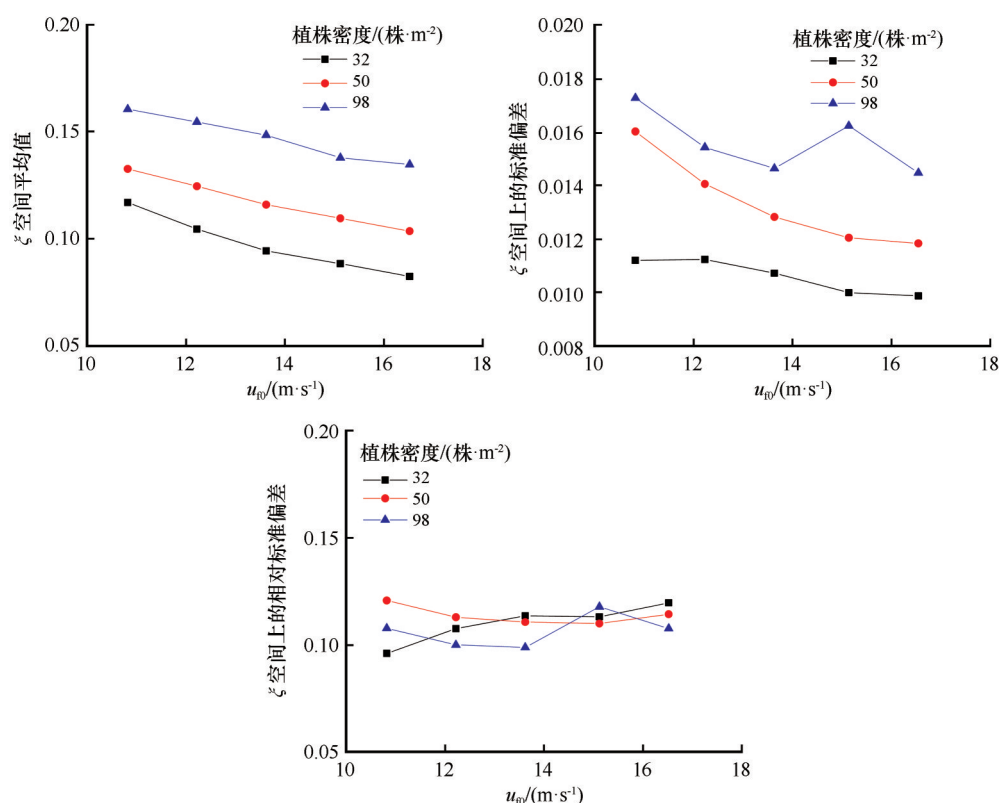


图9 地表剪应力脉动强度的空间平均值、标准偏差和相对标准偏差随植株密度和来流风速的变化
Fig.9 Variation of mean value, standard deviation and relative standard deviation of fluctuation intensity of surface shear stress in space with plant density and incoming wind speed

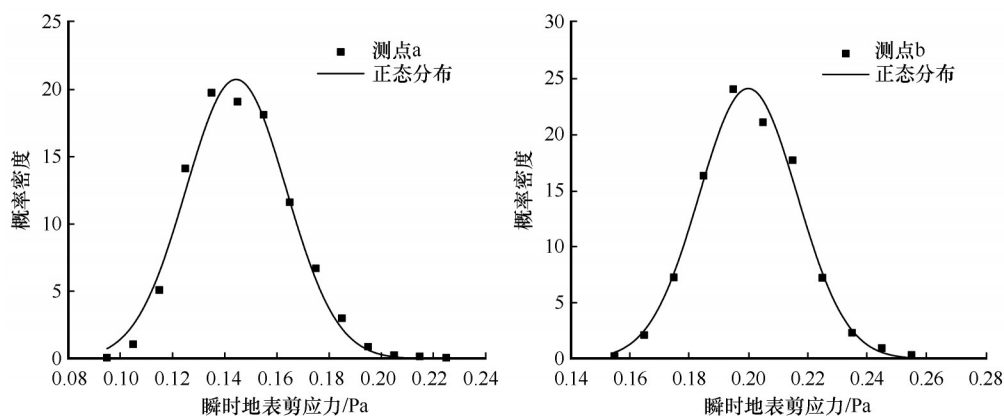


图10 测点a和b的瞬时地表剪应力概率密度分布
Fig.10 Probability density distribution of instantaneous surface shear stress at measurement points a and b

加的趋势。地表剪应力脉动强度的空间平均值、标准偏差均随风速的增加而减小,随植株密度的增加而增大。地表剪应力及其均方根脉动、脉动强度在空间上的相对标准偏差基本不受风速的影响。瞬时地表剪应力概率密度分布可表示为正态分布函数。

参考文献:

- [1] 吴正. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [2] Leenders J K, Boxel J H V, Sterk G. The effect of single vegetation elements on wind speed and sediment transport in the Sahelian zone of Burkina Faso [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 32: 1454–1474.
- [3] Sterk G, Hermann L, Bationo A. Wind-blown nutrient transport and soil productivity changes in southwest Niger [J]. *Land Degradation and Development*, 1996, 7: 325–335.
- [4] Dong Z B, Man D Q, Luo W Y, et al. Horizontal aeolian sediment flux in the Minqin area, a major source of Chinese dust storms [J]. *Geomorphology*, 2010, 116: 58–66.

- [5] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion[J]. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17: 50–68.
- [6] Miri A, Dragovich D, Dong Z B. Vegetation morphologic and aerodynamic characteristics reduce aeolian erosion[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 12831.
- [7] 董治宝, 陈渭南, 李振山, 等. 植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1996(2): 1–8.
- [8] 张春来, 邹学勇, 董光荣, 等. 植被对土壤风蚀影响的风洞实验研究[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(3): 31–33.
- [9] Marshall J K. Drag measurements in roughness arrays of varying densities and distribution [J]. *Agricultural Meteorology*, 1971, 8: 269–292.
- [10] Crawley D M, Nickling W G. Drag partition for regularly-arrayed rough surfaces [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2003, 107: 445–468.
- [11] Brown S, Nickling W G, Gillies J A. A wind tunnel examination of shear stress partitioning for an assortment of surface roughness distributions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: F02S06.
- [12] Walter B, Gromke C, Lehning M. Shear-stress partitioning in live plant canopies and modifications to Raupach's model [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 144: 217–241.
- [13] Walter B, Gromke C, Leonard K C, et al. Spatio-temporal surface shear-stress variability in live plant canopies and cube arrays [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2012, 143: 337–356.
- [14] Kang L Q, Zhang J J, Yang Z C, et al. Experimental investigation on shear-stress partitioning for flexible plants with approximately zero basal-to-frontal area ratio in a wind tunnel [J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 2018, 169(2): 251–273.
- [15] 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.
- [16] Gillies J A, Lancaster N, Nickling W G, et al. Field determination of drag forces and shear stress partitioning effects for a desert shrub (*Sarcobatus vermiculatus*, greasewood) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(D20): 24871–24880.
- [17] Gillies J A, Nickling W G, King J. Drag coefficient and plant form response to wind speed in three plant species: Burning Bush (*Euonymus alatus*), Colorado Blue Spruce (*Picea pungens glauca.*), and Fountain Grass (*Pennisetum setaceum*) [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107(D24): 4760.
- [18] Udo K, Takewaka S. Experimental study of blown sand in a vegetated area [J]. *Journal of Coastal Research*, 2007, 23(5): 1175–1182.

Characteristics of instantaneous surface shear stress distribution at flexible plant surface

Kang Liqiang, Li Caiyun, Zhang Junjie, Zou Xueyong

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology / Engineering Center of Desertification and Blown-Sand Control of Ministry of Education, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Surface shear stress caused by wind shear on the surface is instantaneous due to wind turbulence. This paper focuses on the study of distribution characteristics of instantaneous surface shear stress at the flexible plant surface in order to evaluate the plant protection against wind erosion. The space distribution of instantaneous surface shear stress at the slender flexible plant surface is measured at different plant densities and incoming wind speeds in a wind tunnel. The results show that the surface shear stress increases on both sides of the plant and decreases upwind and downwind of the plant. With the increase of incoming wind speed, the spatial mean value and standard deviation of surface shear stress and RMS surface shear stress fluctuation increase, while the spatial mean and standard deviation of fluctuation intensity of surface shear stress decrease, and their relative standard deviations in space are generally unaffected by wind speed. With the increase of plant density, the spatial mean value and standard deviation of surface shear stress decrease, and the spatial mean value of RMS surface shear stress fluctuation also decreases, while the relative standard deviation of surface shear stress in space and the spatial mean value and standard deviation of fluctuation intensity of surface shear stress increase.

Key words: instantaneous surface shear stress; flexible plant; wind tunnel experiment