

亢力强,张琴,张萌.风洞边界层内单细长柔性植株周围地表气流剪应力分布特征[J].中国沙漠,2023,43(4):128-134.

风洞边界层内单细长柔性植株周围 地表气流剪应力分布特征

亢力强,张琴,张萌

(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: 地表剪应力表征了风对地表产生的剪切效应,是评估地表风蚀强度的风动量指标。研究植株周围地表剪应力分布特征对理解植被的防护效应有着重要意义。采用地表剪应力测试系统测量了风洞边界层中单个细长柔性植株周围地表剪应力及分布趋势。结果表明:从植株上风向到下风向,地表所受的气流剪切应力先减小而后逐渐增加至来流地表剪应力的数值;沿植株两侧方向,地表剪应力逐渐减小至来流地表剪应力的数值。与圆木棒模型相比,植株周围最小地表剪应力是圆木棒的0.51~0.74倍,并且地表剪应力小于来流值90%的平均面积是圆木棒的9.7倍。应用地表剪应力分布对单植株抗风蚀能力的评估表明细长柔性植株能减弱输沙率,比圆木棒模型更能有效地保护地表。

关键词: 地表剪应力; 柔性植株; 刚性圆木棒; 风洞边界层

文章编号: 1000-694X(2023)04-128-07

DOI: 10.7522/j.issn.1000-694X.2023.00020

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],造成脆弱的生态系统恶化,产生风沙灾害、大气污染和土地退化等^[2],成为一个全球性的环境问题。土壤风蚀防治问题成为人们关注的焦点。由于植被可减小风速、抑制风蚀^[3],并具有改善局部环境的能力^[4],因此,种植植物成为土壤风蚀防治的重要措施。稀疏植被常见于干旱和半干旱区^[5],植株之间的气流影响较弱或互不影响^[2-3],故稀疏植被对气流或风蚀影响的研究可简化为单植株情况。地表气流剪应力是风作用于地表的剪切作用产生的,简称地表剪应力,是侵蚀的最根本动力来源。对于可蚀性地表,通常地表剪应力值较大的区域,侵蚀越严重,反之侵蚀则较弱,显然地表剪应力空间分布状态可以反映单植株对地表的保护作用。因此,研究单植株周围地表剪应力的分布规律对于稀疏植被地区风蚀研究具有重要意义。

目前单个孤立粗糙元周围地表剪应力空间分布研究方面很不充分,仅将植株简化为圆柱、方柱

等刚性粗糙元进行研究,而对于孤立的草、灌等植株未见相关报道。Sutton等^[6]测量了单个刚性无孔圆柱粗糙元周围的地表剪应力分布,圆柱的直径和高度均为2.54 cm,结果表明地表剪应力的大小随着主流风速的增加而增加,圆柱两侧地表剪应力增加,前后地表剪应力减小,在圆柱体下风向4~5倍圆柱高度的位置以后,地表剪应力恢复到来流值并有轻微增大。Walter等^[7]测量了长、宽、高分别为6、6、10 cm的方柱周围的地表剪切风速分布,由于地表剪应力与地表剪切风速的平方成正比,因此,地表剪切风速分布可以定性反映地表剪应力的分布,他们发现方柱上下风向剪切风速减小,两侧剪切风速增加,且下风向剪切风速减小区域可延伸到下风向4倍方柱高度的位置,大约在5倍方柱高度位置以后,出现了剪切风速轻微增大的情况,这与前述报道的圆柱周围地表剪应力分布情况基本一致^[6]。

与致密刚性固体粗糙元不同,柔韧多孔的植株由于其复杂形变特征和透风性能使其具有更好的吸收风动量的潜力。与刚性固体粗糙元相比较,植株柔韧性使植株在风力作用下更易变形,变形后的

收稿日期:2023-02-02; 改回日期:2023-03-07

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

植株进一步影响气流,通过多孔树冠枝叶的弯曲、摇摆来增加气流动量耗散,引起植株对气流阻力的改变^[8-9]。已有研究还表明有多孔网状方柱形粗糙元比无孔圆柱固体粗糙元更能有效地减小风蚀^[10]。可见,植株的多孔柔性特征会对植株后方的防护区域产生显著的影响^[11]。由于刚性固体粗糙元模型不能充分模拟多孔柔性植株模型的空气动力学特征,故有必要进一步研究多孔柔性植株的地表剪应力分布规律。因此,本文利用柔性植株塑料模型来研究单植株周围地表剪应力的空间分布特征,并探究其与刚性圆柱粗糙元地表剪应力分布的区别,这将有助于对稀疏植被抗风蚀机理的理解。

1 材料与方法

柔性植株模型采用塑料制作,呈细长状(图1),可认为其宽度随高度变化较小,可近似表示诸如小麦、狗尾草等细长状植物。在静止状态下高度(最高叶子位置)为9.7 cm,迎风面积为9.1 cm²。为了更好地反映柔性对地表剪应力的影响,还测量了刚性圆木棒周围的地表剪应力分布来对比。圆木棒也呈细长状,高度为8.0 cm,直径为1.0 cm,那么迎风面积为8 cm²。这两种模型高度、迎风面积可认为比较接近,利于进行定量比较。

试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沙环境与工程风洞中进行,该风洞为直流吹气式风洞,实验段长16 m,横截面高、宽均为1 m。植株位置处风洞边界层厚度约为

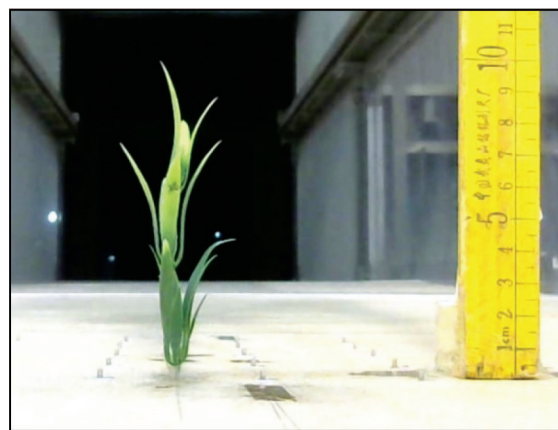


图1 细长柔性植株模型

Fig.1 The slender flexible plant model

0.3 m。来流风速设为8.0、10.8、12.0、13.6、16.5 m·s⁻¹,对应来流摩阻风速分别为0.32、0.44、0.48、0.55、0.65 m·s⁻¹。

单植株周围的地表剪应力分布采用地表剪应力测量系统进行测量,该系统由地表剪应力探头、微压差变送器、数据采集板和计算机组成^[12]。柔性植株和圆木棒周围地表剪应力测量点的位置如图2所示。其中柔性植株模型的地表剪应力测点分布范围为-25 cm<x<50 cm、-12.5 cm<y<12.5 cm, x和y分别表示流动方向和侧向方向的坐标,植株位于原点(0,0)处。由于刚性圆木棒比较细(直径1 cm),其影响范围较小,因此,其地表剪应力测点分布范围较小,为-10 cm<x<12.5 cm、-12.5 cm<y<12.5 cm。

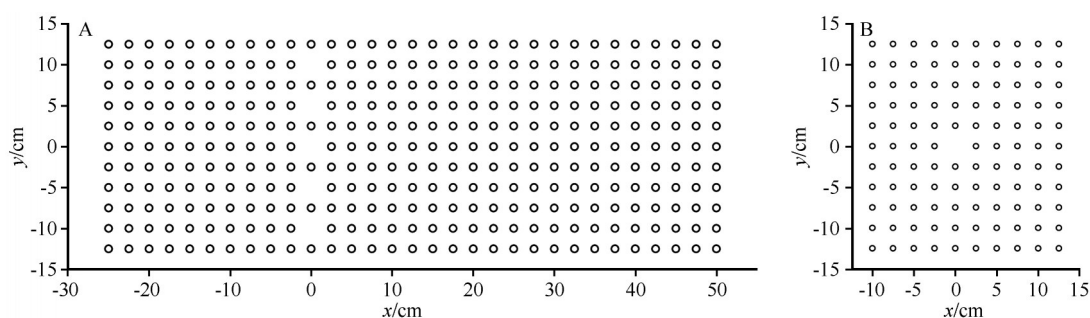


图2 柔性植株(A)和圆木棒(B)周围地表剪应力测点位置

Fig.2 Positions of measurement points of surface shear stress around flexible plant (A) and rigid round stick (B)

2 结果与分析

2.1 地表气流剪应力的空间分布

从图3可以看出,植株和圆木棒模型周围地表剪应力空间分布基本特征为模型两侧地表剪应力

增加,而上、下风向地表剪应力减小。随着来流风速的增加,两类模型周围地表剪应力的大小均增加。地表剪应力空间分布的这种基本特征产生的原因是,气流在粗糙元模型周围绕流导致模型两侧气流速度增加,从而两侧地表剪应力增加,但由于

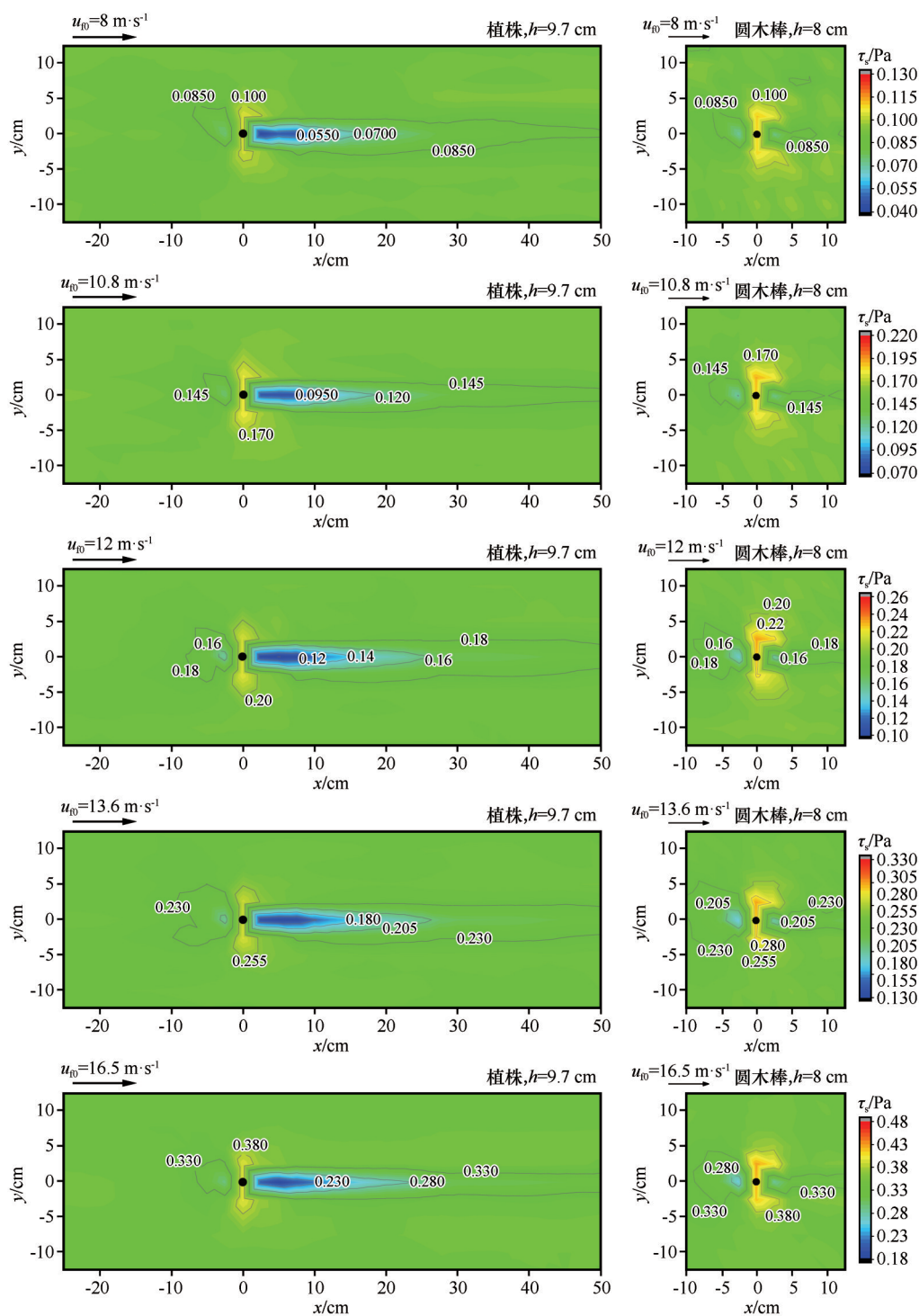


图3 细长柔性植株和刚性圆木棒周围地表剪应力分布的比较(黑色圆点为模型位置,
 u_0 为来流风速, h 为植株模型静止高度, τ_s 为地表剪应力)

Fig.3 Comparison of surface shear stress distribution around slender flexible plant and rigid round stick
 (The black dot is the position of plant model, u_0 is the incoming wind speed, h is the height
 of plant model in still air, τ_s is the surface shear stress)

阻挡作用导致模型正前方、正后方气流速度减小,从而模型上、下风向地表剪应力减小。本文单植株模型前后和两侧地表剪应力变化的这种特征,与已

有刚性圆柱和方柱的报道一致^[6-7]。

两类模型周围地表剪应力分布还表现出不同的特点。与圆木棒相比,细长柔性植株下风向的地表

剪应力减小区域有较长的延伸,并且减小程度较大。植株模型下风向地表剪应力减小的区域面积一般也大于圆木棒模型(图4A)。如果以地表剪应力减小为来流值的90%为界进行统计,那么,植株周围地表剪应力小于来流值90%的平均面积是圆木棒的9.7倍。可能原因是:在风力作用下细长柔性植株更易变形,呈流线化向后弯曲,弯曲后的植株对下风向地表有更好的遮蔽保护作用,另一方面,植株枝叶的摆动可以更有效吸收气流动量,这均导致植株下风向气流速度进一步减小,小于细长刚性圆木棒情况,因此,植株下风向地表剪应力的值也会小于圆木棒。

圆木棒模型两侧地表剪应力增大的区域面积大于柔性植株模型(图4B)。如果以地表剪应力增加为来流值的1.1倍为界进行统计,那么,植株周围地表剪应力大于来流值1.1倍的平均面积是圆木棒的0.4倍。这是由于气流在模型两侧的绕流强度不同导致的。柔性植株流线化变形导致其对气流的阻力减小,其根部直径也较小,而直径为1 cm的刚性圆木棒不发生变形,对气流阻力较大,因此,刚性圆木棒两侧气流绕流强度大于柔性植株,其两侧气流速度较大,从而圆木棒模型两侧地表剪应力也较大,影响区域面积也会较大。

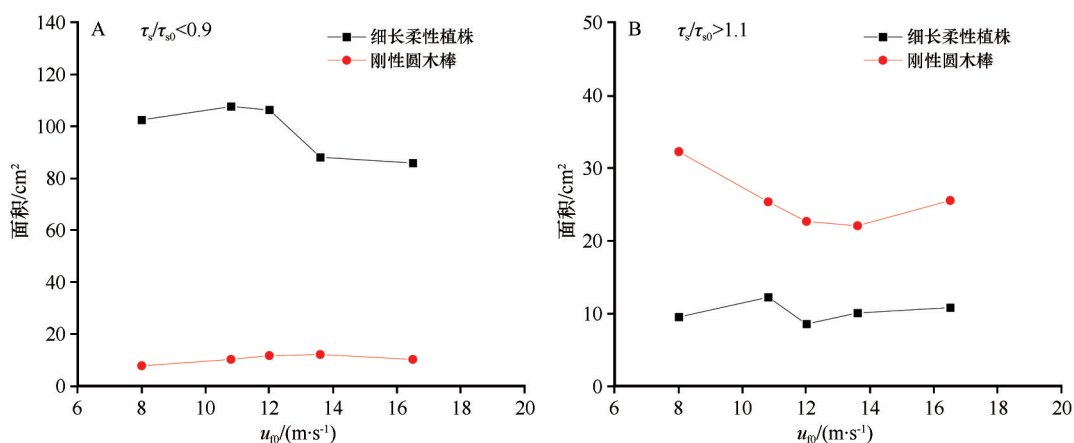


图4 细长柔性植株和刚性圆木棒周围地表剪应力减小区域(A)和增加区域(B)的比较(τ_{s0} 为来流地表剪应力, τ_s/τ_{s0} 为局部地表剪应力与来流地表剪应力的比值)

Fig.4 Comparison of areas of decreased (A) and increased (B) surface shear stress between slender flexible plant and rigid round stick (τ_{s0} is the incoming surface shear stress, τ_s/τ_{s0} is the ratio of local surface shear stress to the incoming surface shear stress)

2.2 地表气流剪应力沿植株侧向的变化趋势

植株和圆木棒模型的最大地表剪应力均位于模型两侧(0, ±2.5 cm)位置处。沿模型两侧方向,地表剪应力逐渐减小至来流地表剪应力大小(图5)。由于气流绕流,模型两侧气流速度迅速增加,然后随着离开植株模型的距离增加,气流速度逐渐降低,因此,模型两侧地表剪应力迅速增加,然后逐渐减小。

柔性植株两侧的最大地表剪应力的增加程度小于圆木棒。柔性植株两侧最大地表剪应力为来流值的1.1~1.14倍(即增大10%~14%),而圆木棒两侧最大地表剪应力为来流值的1.17~1.24倍(即增大17%~24%)。圆木棒两侧最大地表剪应力为柔性植株的1.06~1.08倍。还可看出两类模型对侧向地表剪应力的影响主要差别在于靠近模型的区域,而距

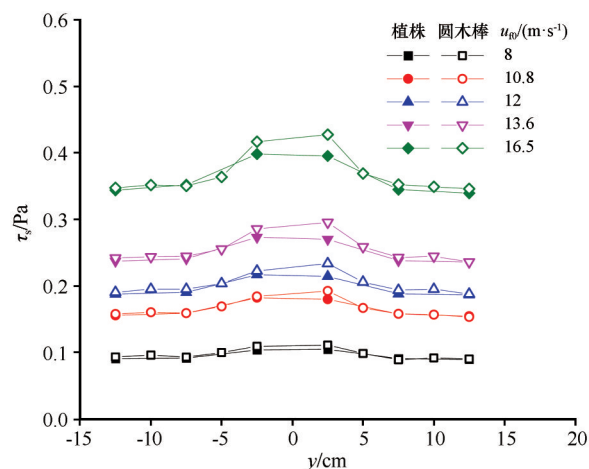


图5 细长柔性植株和刚性圆木棒侧向地表剪应力的比较(流向位置为 $x=0$ cm)

Fig.5 Comparison of surface shear stress on the sides of slender flexible plant and rigid round stick ($x=0$ cm)

离模型较远处基本没有区别。

2.3 植株前后地表剪应力的变化趋势

在植株和圆木棒模型正前方,两者地表剪应力随流向的变化基本相同。而在模型后方,圆木棒模型的地表剪应力沿流向很快恢复,而柔性植株后方的地表剪应力沿流向恢复较慢,这说明柔性植株对下风向地表的保护作用大于刚性圆木棒模型(图6)。柔性植株前后最小地表剪应力为来流值的0.44~0.55倍(即减小45%~56%),而圆木棒前后最小地表剪应力为来流值的0.75~0.79倍(即减小21%~25%)。植株前后最小地表剪应力约为圆木棒的0.51~0.74倍。圆木棒模型下风向地表剪应力恢复到来流地表剪应力的90%时下风向位置为0.5~0.6倍模型高度,而柔性植株下风向地表剪应力在下风向约3倍模型高度处恢复到来流地表剪应力的88%,在4.4~5.2倍模型高度处恢复到来流地表剪应力的90%。

Sutton等^[6]的研究报道了圆柱体下风向地表剪应力在约4~5倍圆柱高度的位置恢复到来流地表剪应力大小,而本文圆木棒模型在下风向位置为0.5~0.6倍模型高度处地表剪应力恢复到来流地表剪应力的90%,这种地表剪应力恢复速度的差别可能是由于圆柱纵横比不同导致的,本文圆柱纵横比为8,远大于Sutton等^[6]使用的圆柱,其纵横比为1。

2.4 地表剪应力与风速关系

由于地表剪应力是风对地表的剪切作用引起的,因此,地表剪应力和风速之间存在一定的关系。为此,测量了来流风速为8.0、10.8、13.6 m·s⁻¹时模型前后1 cm高度处水平风速沿流向的变化情况。距

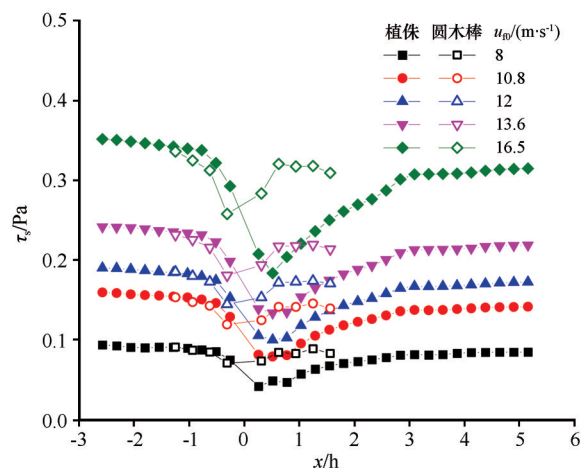


图6 细长柔性植株和刚性圆木棒前后地表剪应力的比较(横向位置为 $y=0$ cm)

Fig.6 Comparison of surface shear stress upwind and downwind of slender flexible plant and rigid round stick ($y=0$ cm)

离地表面越近,风速与地表剪应力的相关性应该越高,因此,尽可能选择较低高度处的风速,然而由于皮托管尺寸原因,故选择了风速测量高度为1 cm。

由图7可知,地表剪应力随风速的增加而增加,并且地表剪应力 τ_s 与 $\rho_a u_{f,z=1\text{cm}}^2$ 基本呈线性关系:

$$\tau_s = \alpha \rho_a u_{f,z=1\text{cm}}^2 \quad (1)$$

式中: α 为系数; ρ_a 表示空气密度; $u_{f,z=1\text{cm}}$ 表示1 cm高度处风速。

对于柔性植株和圆木棒模型,比例系数 α 分别为0.0025和0.0028,比较接近,说明靠近地表的风速空间分布可用来表征地表剪应力的分布,这为测量带来方便。另一方面,还可看出,图中实验数据点与线性拟合曲线还存在一定的偏离,这表明如果从风速数据来推测地表剪应力的变化,那么尽管可推测地表剪应力沿流向的大致变化规律,然而具体数

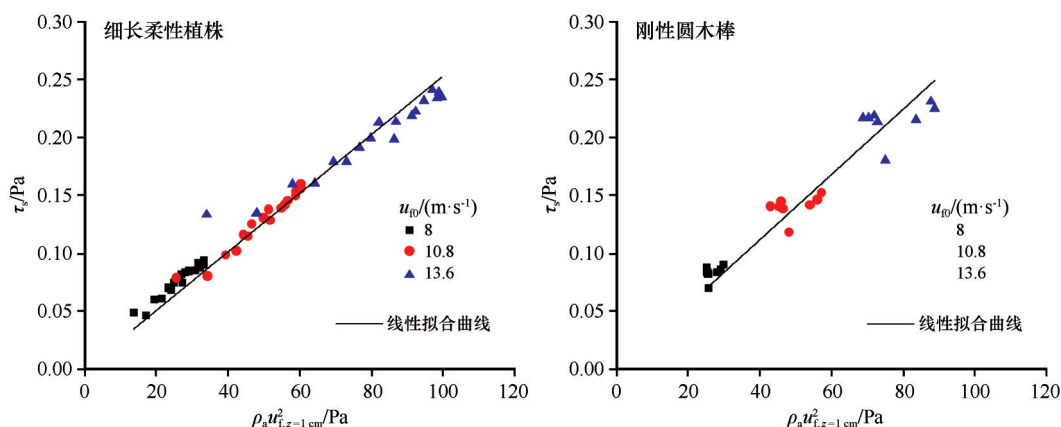


图7 地表剪应力与1 cm高度处风速的关系

Fig.7 Relationship between surface shear stress and wind speed at 1 cm height

值会有误差,这个误差一般小于15%。

2.5 应用地表剪应力分布评估单植株抗风蚀能力

单植株抗风蚀能力的评估可通过单植株对来流输沙率的减弱程度来表征:

$$\eta = 1 - \frac{Q}{Q_0} \quad (2)$$

式中: η 表示输沙率的减弱程度; Q 表示受植株影响的平均输沙率; Q_0 为来流输沙率(即不受植株影响的输沙率)。

将单植株周围的地表划分为许多子区域,每个子区域由于地表剪应力不同而导致不同的局部输沙率,再将每个子区域输沙率的贡献叠加起来,就得到受植株影响的平均输沙率 Q :

$$Q = \sum_{i=1}^N Q_{s,i} \phi_i \quad (3)$$

式中: ϕ_i 为第 i 个子区域的面积占单植株周围测量区域总面积的面积份额; N 为子区域的总数目; $Q_{s,i}$ 为第 i 个子区域处的局部输沙率。

输沙率的表达式,采用如下形式:

$$Q_{s,i} = C \frac{\rho_a}{g} u_{*s,i}^3 \left(1 - \frac{u_{*ts}}{u_{*s,i}} \right) \quad (4)$$

$$Q_0 = C \frac{\rho_a}{g} u_{*s0}^3 \left(1 - \frac{u_{*ts}}{u_{*s0}} \right) \quad (5)$$

式中: C 为系数; ρ_a 为空气密度($1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$); g 为重力加速度($9.8 \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$); u_{*ts} 为沙粒起动的临界摩阻风速; $u_{*s,i}$ 为第 i 个子区域处的地表摩阻风速; u_{*s0} 为来流摩阻风速。它们与地表剪应力的关系如下:

$$u_{*s,i} = \sqrt{\tau_{s,i} / \rho_a} \quad (6)$$

$$u_{*s0} = \sqrt{\tau_{s0} / \rho_a} \quad (7)$$

式中: $\tau_{s,i}$ 和 τ_{s0} 分别为第 i 个子区域处的局部地表剪应力和来流地表剪应力。

通过式(2)~(7)可以将地表剪应力分布与输沙率的减弱程度联系起来。从图8可以看出,细长柔性植株的输沙率减弱程度大于0,意味着细长柔性植株可能具有一定的抗风蚀能力,可能原因是细长柔性植株弯曲后对下风向地表的遮蔽作用增强。而刚性圆木棒的输沙率减弱程度小于0,意味着刚性圆木棒可能会增强风蚀强度,可能原因是刚性圆木棒细长(纵横比为8)、直径较小,对下风向地表的遮蔽作用很弱。随着来流风速的增加,细长柔性植株和刚性圆木棒的输沙率减弱程度数值的绝对值均减小,说明它们对来流输沙率的影响减弱。

根据 McKenna Neuman 等^[13-14]的实验研究,圆

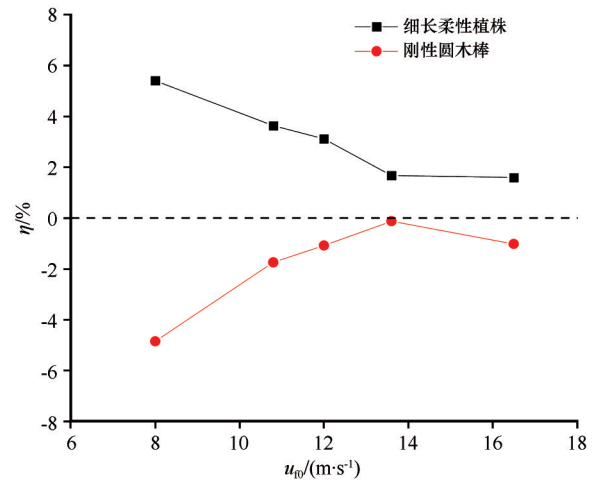


图8 细长柔性植株和刚性圆木棒的输沙率减弱程度的比较

Fig.8 Comparison of reduced degree of sand transport rate between slender flexible plant and rigid round stick

柱周围以侵蚀为主,而下风向沉积区域很小。Kang 等^[15]实验中8 cm高的圆木棒与本文相同,其侵蚀区域大于沉积区域。这与本文通过地表剪应力分布来评估的细长圆木棒会增强风蚀的结果一致,这说明本文的评估方法有一定的参考价值。

需要指出,所选区域范围对输沙率减弱程度的计算值有一定的影响。本文所选区域已经包括了粗糙元影响的主要范围,此时所选区域范围增加会降低输沙率减弱程度的数值,但不会影响数值的正负,因此,计算结果不影响单植株增强风蚀还是减弱风蚀的判断。

3 结论

单个细长柔性植株和单个细长刚性圆木棒模型周围地表剪应力空间分布基本特征为沿流动方向地表剪应力先减小而后逐渐增加恢复到来流值,沿模型两侧方向地表剪应力逐渐减小到来流值。随着来流风速的增加,模型周围地表剪应力的大小均增加。与细长刚性圆木棒相比,细长柔性植株周围最小、最大地表剪应力均较小,地表剪应力大于来流值1.1倍的平均面积是圆木棒的0.4倍,而地表剪应力小于来流值90%的平均面积是圆木棒的9.7倍。提出应用地表剪应力分布对单植株抗风蚀能力的评估模型,评估结果表明细长柔性植株比细长刚性圆木棒模型更能有效地保护地表,也说明该评估方法有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 吴正,等.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] Wolfe S A, Nickling W G. The protective role of sparse vegetation in wind erosion [J]. *Progress in Physical Geography*, 1993, 17: 50–68.
- [4] 朱雅娟, 李虹, 赵淑伶, 等. 共和盆地不同类型防护林的改善小气候效应[J]. *中国沙漠*, 2014, 34(3): 841–848.
- [5] 杨文斌, 王涛, 冯伟, 等. 低覆盖度治沙理论及其在干旱半干旱区的应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 1–5.
- [6] Sutton S L F, McKenna Neuman C. Variation in bed level shear stress on surfaces sheltered by nonerodible roughness elements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: F03016.
- [7] Walter B, Gromke C, Leonard K, et al. Spatially resolved skin friction velocity measurements using Irwin sensors: a calibration and accuracy analysis [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 104/106: 314–321.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Gillies J A, Nickling W G, Nikolich G, et al. A wind tunnel study of the aerodynamic and sand trapping properties of porous mesh 3-dimensional roughness elements [J]. *Aeolian Research*, 2017, 25: 23–35.
- [11] Lee J P, Lee E J, Lee S J. Shelter effect of a fir tree with different porosities [J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2014, 28(2): 565–572.
- [12] 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.
- [13] McKenna Neuman C, Sanderson R S, Sutton S. Vortex shedding and morphodynamic response of bed surfaces containing non-erodible roughness elements [J]. *Geomorphology*, 2013, 198: 45–56.
- [14] McKenna Neuman C, Bédard O. A wind tunnel study of flow structure adjustment on deformable sand beds containing a surface-mounted obstacle [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2015, 120: 1824–1840.
- [15] Kang L Q, Zhang W, Zou X Y. Variation of bed microtopography with time around an isolated surface-mounted cylindrical roughness element and its influence on wind flow [J]. *Aeolian Research*, 2021, 50: 100688.

Characteristics of surface shear stress distribution around a slender flexible plant model in wind tunnel boundary layer

Kang Liqiang, Zhang Qin, Zhang Meng

(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 reflects the shearing effect of wind on the surface, which is a wind momentum index to evaluate the intensity of wind erosion. Study on the characteristics of surface shear stress distribution around a plant is of great significance for understanding the protective effect of vegetation. In this paper, the surface shear stress measurement system is used to measure the surface shear stress distribution around a single slender flexible plant in the wind tunnel boundary layer. The results show that from the upwind direction to the downwind direction of the plant, the surface shear stress first decreases and then gradually increases to the incoming value. Along the two sides of the plant, and the surface shear stress gradually decreases to the incoming value. Compared with the round stick model, the minimum surface shear stress around the plant is 0.51–0.74 times that of the round stick, and the average area where the surface shear stress is less than 90% of the incoming value is 9.7 times that of the round stick. The evaluation of wind erosion resistance by using the distribution of surface shear stress shows that the slender flexible plant can weaken the sand transport rate and protect the surface more effectively than the round stick model.

Key words: surface shear stress; flexible plant; rigid round stick; wind tunnel boundary layer