

草地近地表风速脉动及其与平均风速、摩阻风速的关系

刘欣宇, 张春来, 张慧, 代豫杰, 岑松勃, 沈亚萍

(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, 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875)

摘要: [目的] 研究草地近地表脉动风速与平均风速、摩阻风速之间的关系, 揭示草地风速脉动规律。[方法] 利用三维超声风速仪对天然草地近地表风速进行连续观测。[结果] 草地近地表风速存在明显的脉动特性, 脉动强度与平均风速之间呈显著线性正相关。湍流度在较小风速下分布非常分散, 随平均风速的增大而趋于集中, 在 2~14 m/s 风速范围内概率分布峰值对应的湍流度为 0.23。摩阻风速与瞬时风速之间缺乏相关性; 1 s 时距下摩阻风速与平均风速呈显著线性正相关, 但风速脉动导致摩阻风速计算结果波动仍非常明显; 1 min 时距下摩阻风速波动范围降低至 10% 以下, 摩阻风速与平均风速线性相关性极为显著。[结论] 风速脉动对摩阻风速的计算有很大影响, 采用 1 s 或 1 min 时距的平均风速, 可有效降低这一影响。

关键词: 草地; 平均风速; 风速脉动; 湍流度; 摩阻风速

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)05-0060-04

中图分类号: P425

文献参数: 刘欣宇, 张春来, 张慧, 等. 草地近地表风速脉动及其与平均风速、摩阻风速的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(5): 60-63. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2020.05.010; Liu Xinyu, Zhang Chunlai, Zhang Hui, et al. Characteristics of wind velocity pulsation and its relation to average wind velocity and friction wind velocity [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 60-63.

Characteristics of Wind Velocity Pulsation and Its Relation to Average Wind Velocity and Friction Wind Velocity

Liu Xinyu, Zhang Chunlai, Zhang Hui, Dai Yujie, Cen Songbo, Shen Yaping

(State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, MOE Engineering Research Center of Desertification and Blown-sand Control, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: [Objective] The characteristics of wind velocity pulsation and its relation to the average wind velocity and friction wind velocity were studied to reveal the rule of the wind velocity pulsation above grassland. [Methods] A sonic anemometer was used to observe the near surface wind velocity above the grassland. [Results] The near surface wind velocity had obvious pulsating characteristics, and there was a significant positive linear correlation between the pulsation intensity and the average wind velocity. The turbulence distribution was very scattered at a low wind velocity but tended to concentrate with the increase of the average wind velocity. The turbulence intensity at the peak of its probability distribution curve was 0.23 under a wind velocity ranging from 2 to 14 m/s. There was no correlation between the friction wind velocity and the instantaneous wind velocity. The friction wind velocity was positively and linearly correlated with the average wind speed at 1 s time intervals, but the fluctuation of the calculated results was still obvious because of wind velocity pulsation. At 1 min time intervals, the influence of wind pulsation on friction velocity was approximately 10%, and the linear correlation between friction wind velocity and average wind speed was extremely significant. [Conclusion] The wind velocity pulsation has a great influence on the calculation of the friction wind velocity. Using the average wind velocity at 1 s or 1 min time intervals can effectively reduce this influence.

Keywords: grassland; average wind velocity; wind velocity pulsation; turbulence intensity; friction velocity

风是塑造风沙地貌形态的基本营力之一, 风速的大小决定了可能搬运的沙粒的数量。风沙研究中通

常用平均风速来代替瞬时风速, 而引起沙粒运动的风几乎都是湍流, 气流速度大小和方向都具有脉动性,

这是导致风和风沙流“阵性”特征的主要原因^[1]。已有研究发现风速脉动使沙粒受到跃移上升力和剪切力,会引发沙粒振动与起动^[2],还与输沙量具有良好的相关关系^[3]。因此在研究风沙问题时,需要考虑风速的脉动特征。目前相关研究大部分集中在风速脉动对沙粒输移的影响,侧重于沙粒跃移、输沙率等对风速脉动的响应^[4-7]。其次是不同地表类型下的风速脉动特征研究,在一定的环流背景下,下垫面性质影响局地气流特性^[8]。其中,尚河英等^[9]观测表明戈壁地表风速脉动具有非平稳性特征,并随风速增强而增大;毛东雷等^[10]研究发现流沙地、半固定沙地、固定沙地和绿洲内部4个典型下垫面的风速脉动幅度随植被盖度增加而增大;王雪芹等^[11]观测表明沙漠—绿洲过渡带典型下垫面的风速脉动相对值总体上呈现随植物密度增大而增大的趋势,植物群落结构的差异增加了相对风速脉动垂直分布的复杂性。中国农牧交错带及其以北地区分布广阔的草地是重要且典型的风蚀地表类型之一,由于植被具有柔性和易变形特点,研究植被覆盖下近地表风速脉动规律,对揭示柔性粗糙元干扰机制具有重要意义。本文通过河北坝上地区天然草地近地表三维超声风速的连续观测,分析脉动风速与平均风速、摩阻风速之间的关系,揭示草地风速脉动规律。

1 研究方法

1.1 野外观测

野外观测点位于河北省康保县西部,地理坐标为114°31'22"E,41°51'37"N,处于北方农牧交错带中段。该地区为温带大陆性气候,年均气温1.2℃,年均降水量为340mm,气候干燥。风向以西北风为主,年平均风速为3m/s,大风日数约为60d,年均沙尘暴日数14d。其中春季平均风速最大,土壤风蚀频发。观测点所在的天然草地植被平均高度为9cm,植被覆盖度约50%,地形平坦,远离农田防护林和建筑物。风速测量仪器为三维超声风速仪(R. M. Young Co., USA),测量频率为50Hz,测量高度为1m。连续观测于2019年4月17日至5月16日完成,为该区域大风较为频繁的时期。

1.2 数据处理

选取5月12日6:00—24:00连续18h的风速数据,分析风速脉动特征。该时段为持续时间最长、风力最强劲的一次系统性天气过程。数据处理分为两步,第一步是对原始数据进行校准,本文采用Hyson和Van公式^[12-13]分别对数据进行了水平、垂直和角度三次校准。第二步,使用校准后的数据计算

平均风速、脉动强度、湍流度和摩阻风速。

平均风速数据分析长度即统计时距为1min。脉动风速为瞬时风速与平均风速之差,风速脉动强度以风速脉动值的均方根表示^[1]:

$$I = \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u - \bar{u})^2} \quad (1)$$

式中: I 为脉动强度; u 为瞬时风速; \bar{u} 为平均风速; u' 为脉动风速。由于标准差(方差)表示随机变量瞬时值向平均值两侧偏离的程度,因此可以将1min时距的脉动风速标准差与平均风速之比来定量表示湍流的强弱^[14],即湍流度(g):

$$g = \frac{\sqrt{u'^2}}{u} \quad (2)$$

摩阻风速(u_*)采用涡动相关法计算^[15]:

$$u_* = \sqrt{-u'w'} \quad (3)$$

式中: u' 和 w' 分别为校准后水平方向和垂直方向的脉动风速。

2 结果与分析

2.1 风速脉动的总体特征

图1为2019年5月12日06:00—18:30期间瞬时风速随时间的变化,表明风速脉动是持续存在的自然现象,无论风速大小。总体来说,平均脉动风速随平均风速的增大而持续增大,但最大脉动风速则随平均风速增大而在8~10m/s范围内出现峰值,平均风速高于10m/s情形下,最大脉动风速有降低趋势(见图2)。当日观测期间,风力最弱的06:00—08:00时段内,平均风速为3.3m/s,最大脉动风速为2.5m/s;在风力最强的14:00—18:00时段内,瞬时风速波动剧烈,瞬时风速值最大可达24m/s,最大脉动风速超过5m/s。

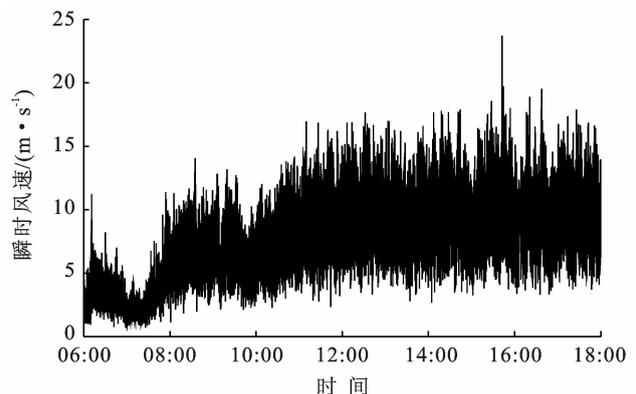


图1 2019年5月12日6:00—18:30瞬时风速变化

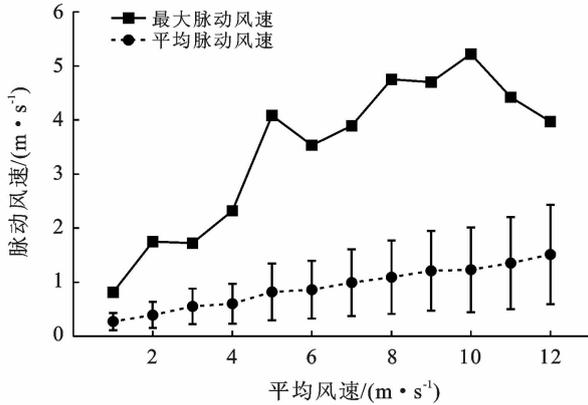


图 2 最大脉动风速和平均脉动风速随平均风速的变化

2.2 脉动强度、湍流度与平均风速的关系

图 3 显示了风速脉动强度和湍流度随平均风速变化的规律。可以看出,平均风速越大,风速脉动强度越大,二者之间存在良好的线性正相关关系($r=0.936, p<0.001$)。根据以往关于戈壁地表^[9]和沙漠

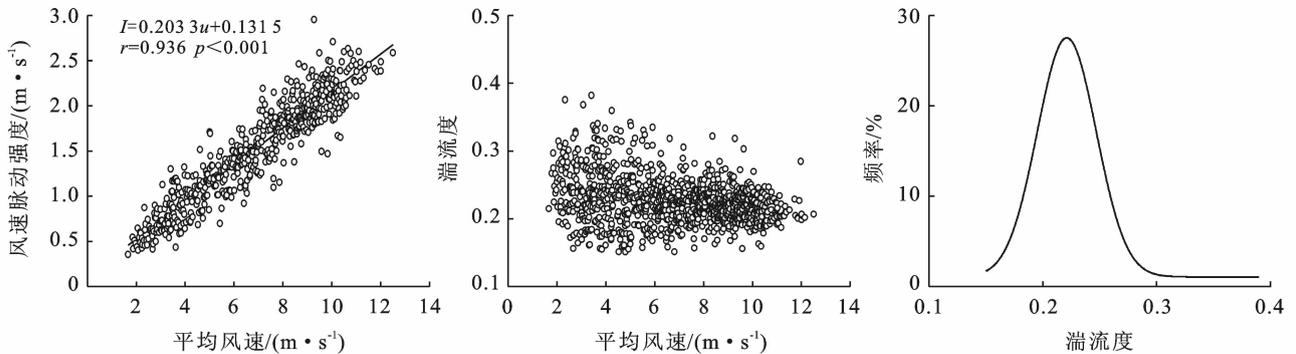


图 3 风速脉动强度、湍流度与平均风速的关系

2.3 风速脉动对摩擦风速的影响

研究表明,摩擦风速与平均风速之间为线性关系^[16]。本文利用三维超声风速仪测定草地 1 m 高度的平均风速和摩擦风速,其中,瞬时摩擦风速直接利用公式(3)进行计算,1 s 时距下的摩擦风速通过对 u' 和 w' 两个方向的脉动风速值分别取 1 s 平均后再利用公式(3)计算得到,1 min 时距则取 1 min 平均后的 u' 和 w' 进行计算。

结果显示,50 Hz 的摩擦风速并没有随瞬时风速(相当于时距为 0.02 s 的平均风速)的增大而呈现出明显的规律性变化趋势,在二者之间的关系图上摩擦风速表现出极度分散的特征,例如 10 m/s 风速下摩擦风速介于 0.04~3.0 m/s 之间,平均 1.02 m/s,变化幅度高达 194%(见图 4)。但 1 s 和 1 min 时距下的摩擦风速和平均风速之间呈非常显著的线性相关

—绿洲过渡带不同类型地表^[10-11]近地面风速脉动的观测结果,相同风速下,本文所观测的草地表面风速脉动高于流沙和戈壁表面的风速脉动而小于灌木植被覆盖的地表,表明植被对近地表气流的干扰作用强于流沙和戈壁地表风沙流对气流的影响,而植被类型和覆盖条件对风速脉动的影响更为显著。

湍流是一个复杂的随机过程,很难采用简单明确的方程来表示,一般通过统计规律来研究湍流。湍流度与平均风速之间的关系同样如此,本文观测表明,在 2~14 m/s 风速范围内,湍流度总体介于 0.15~0.38 之间(属于高强度湍流),与平均风速之间缺乏明显相关性。其中,较小风速下,草地近地表湍流度分布分散,变化幅度大;随风速的增大,湍流度变化幅度减小,湍流度分布趋于集中。进一步统计显示,湍流度概率分布大致满足正态分布,偏度为 0.89,峰度为 1.51,概率分布峰值对应的湍流度为 0.23。

性,相关关系式为 $u_* = a \cdot \bar{u} (r=0.943, p<0.001)$ 。所不同的是,1 s 时距下的摩擦风速仍存在很大的波动。以 10 m/s 平均风速为例,1 s 时距下摩擦风速大致介于 0.25~1.70 m/s 之间,平均 0.96 m/s,变化幅度为 77%。对于 1 min 时距,摩擦风速大致介于 0.67~0.96 m/s 之间,平均 0.87 m/s,变化幅度约为 10%。

可见,平均风速的时距对摩擦风速计算有很大影响。秒级以下时距的平均风速充分反映了风的脉动特征,对摩擦风速的计算影响显著。1 s 和 1 min 时距下的平均风速,显著降低了风速脉动的影响,但是,1 s 时距下的摩擦风速仍具有远高于 50% 的变化幅度,说明该时距下风速脉动的影响仍然很大。1 min 时距下的摩擦风速变化幅度约为 10%,表明该时距下风速脉动的影响已经降到较低水平。

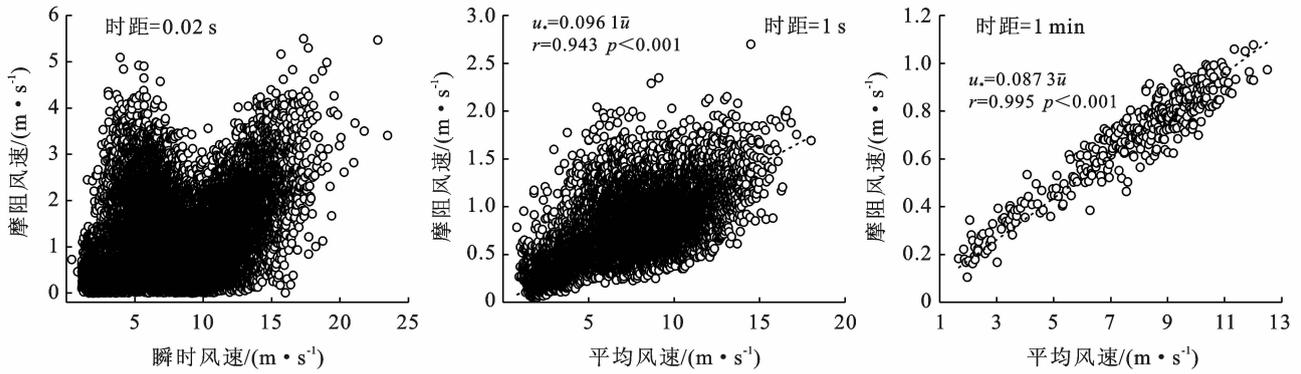


图 4 不同时间距下的平均风速与摩擦风速的关系

摩擦风速决定了风对地表剪切力的大小,是风沙运动研究中最重要参数之一。上述结果表明,不同时间距的风速数据显然具有不同的优势和局限性。对于以颗粒运动—动力学为主要内容的微观风沙运动研究,频率较高的风速数据对探究颗粒与气流相互作用优势明显,但频率太高(比如 50 Hz)也会造成数据过于分散,难以获得有规律的结论。对于以输沙率、风沙流结构等为主要内容的宏观风沙运动研究,风和风沙流的瞬时变化可以忽略,因此 1 min 时间距下的风速数据更具优势。

3 讨论与结论

实地观测表明,草地近地面风速存在脉动现象,脉动强度与平均风速之间存在良好的线性关系,平均风速越大,脉动风速强度和脉动风速的波动范围就越大,而湍流度随平均风速增大而趋于稳定,在 2~14 m/s 风速范围内概率分布峰值对应的湍流度为 0.23。风的脉动还对摩擦风速的计算具有显著影响,表现为摩擦风速与瞬时风速缺乏相关性,相同瞬时风速下摩擦风速变化剧烈。当采用秒级平均风速时,摩擦风速与平均风速显著线性正相关,但风速脉动造成摩擦风速计算结果仍存在剧烈波动;采用 1 min 时间距的平均风速时,二者之间的线性关系极为显著,风速脉动对摩擦风速计算的影响约在 10% 的水平。

风对地表剪切力(τ)取决于摩擦风速的大小($\tau = \rho u_*^2$),因而摩擦风速是土壤风蚀研究中具有特殊重要性的物理量。对于流沙地表,风速脉动对输沙率的影响已被文献证实^[1],其实质是风速脉动影响了摩擦风速进而影响直接作用于流沙表面的剪切力。但对于植被覆盖的地表,风速脉动虽然能够显著影响摩擦风速,但由于其瞬时变化属性和植被作为风力第一时间作用的对象,风速脉动及其导致的摩擦风速变化产生的动量变化首先被植被运动变形所消耗,从而很难导致土壤风蚀产生瞬时变化。因此,我们认为风速脉动

对草地风蚀的影响可以忽略不计。在此情形下,根据本文不同时间距下平均风速与摩擦风速之间关系的研究结果,草地风蚀研究中采用可以基本消除风速脉动影响的 1 min 时间距来统计风速,足以反映草地风蚀随时间和风速的变化过程,而不需要更高频率、体现风速脉动的风速观测。

[参 考 文 献]

- [1] 张克存,屈建军,董治宝,等. 风沙流中风速脉动对输沙量的影响[J]. 中国沙漠,2006,26(3):336-340.
- [2] Lyles L, Krauss R K. Threshold velocities and initial particle motion as influenced by air turbulence [J]. Transactions of the ASABE, 1971,14(3):563-566.
- [3] Butterfield G R. Transitional behaviour of saltation; Wind tunnel observations of unsteady winds [J]. Journal of Arid Environments, 1998,39(3):377-394.
- [4] Chepil W S, Siddoway F H. Strain-gage anemometer for analyzing various characteristics of wind turbulence [J]. Journal of Meteorology, 1959,16(4):411-418.
- [5] 李振山,倪晋仁. 风沙流中风速脉动的实验测量[J]. 应用基础与工程科学学报,2003,11(4):352-360.
- [6] Anderson R S. Eolian sediment transport as a stochastic process: the effect of a fluctuating wind on particle trajectories[J]. The Journal of Geology, 1987, 95(4): 497-512.
- [7] Bisal F, Nielsen K F. Movement of soil particles in saltation[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1962, 42(1):81-86.
- [8] 吴正,等. 风沙地貌与治沙工程学[M]. 北京:科学出版社,2003:16-21.
- [9] 尚河英,尹忠东,张鹏,等. 戈壁地表野外风速脉动特征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2017,41(1):123-128.
- [10] 毛东雷,蔡富艳,杨余辉,等. 新疆策勒 4 个典型下垫面近地层风速脉动特征[J]. 干旱区研究,2017,34(1):126-135.

- [4] 尚建勋,朱悦.东北黑土区侵蚀沟专项治理的几点思考[J].中国水土保持,2017(11):16-18.
- [5] 李浩,张兴义,刘爽,等.典型黑土区村级尺度侵蚀沟演变[J].中国水土保持科学,2012,10(2):21-28.
- [6] 李智广,刘宪春,刘建祥,等.第一次全国水利普查水土保持普查方案[J].水土保持通报,2010,30(3):87-91.
- [7] 中华人民共和国水利部,中华人民共和国国家统计局.第一次全国水利普查公报[J].中国水利,2013(7):1-3.
- [8] 中华人民共和国水利部.黑土区水土流失综合防治技术标准:SL 446-2009[S].北京:中国水利水电出版社,2009:16.
- [9] 杜书立,李浩,陈强,等.典型黑土区侵蚀沟空间分布特征及主要影响因子分析:以黑龙江省引龙河农场为例[J].土壤与作物,2013,2(4):177-182.
- [10] 闫业超,张树文,岳书平.克拜东部黑土区侵蚀沟遥感分类与空间格局分析[J].地理科学,2007,27(2):193-199.
- [11] Li Hao, Cruse R M, Liu Xiaobing, et al. Effects of topography and land use change on gully development in typical Mollisol region of Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2016,26(6):779-788.
- [12] 胡天然,王树力.东北黑土区乌裕尔河流域侵蚀沟变化过程及影响因素[J].南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(1):113-119.
- [13] 姜芸,王军,张莉.东北典型黑土区侵蚀沟形态及分布特征[J].农业工程学报,2020,36(7):157-165.
- [14] 白建宏.东北黑土区侵蚀沟分级初探[J].中国水土保持,2017(10):41-42.
- [15] Liu xiaobing, Li Hao, Zhang Shengmin, et al. Gully erosion control practices in northeast China: A review [J]. Sustainability, 2019,11(18):5065.
- [16] 张兴义,祁志,张晟旻,等.东北黑土区农田侵蚀沟填埋复垦工程技术[J].中国水土保持科学,2019,17(5):128-135.
- [17] 张信宝.关于中国水土流失研究中若干理论问题的新见解[J].水土保持通报,2019,39(6):302-306.
- [18] 朱森森.辽宁土石山区侵蚀沟道综合治理技术模式研究[J].中国水土保持,2019(7):37-39.
- [19] 秦伟,左长清,范建荣,等.东北黑土区侵蚀沟治理对策[J].中国水利,2014(20):37-41.

(上接第 63 页)

- [11] 王雪芹,杨东亮,马洋,等.沙漠—绿洲过渡带典型下垫面风速脉动特征:以塔克拉玛干沙漠南缘策勒绿洲为例[J].中国沙漠,2015,35(3):542-548.
- [12] Hyson P, Garratt J R, Francey R J. Algebraic and electronic corrections of measured uw covariance in the lower atmosphere[J]. Journal of Applied Meteorology, 1977,16(1):43-47.
- [13] van Boxel J H, Sterk G, Arens S M. Sonic anemometers in aeolian sediment transport research [J]. Geomorphology, 2004,59(1/2/3/4):131-147.
- [14] 包慧娟,李振山.风沙流中风速纵向脉动的实验研究[J].中国沙漠,2004,24(2):244-247.
- [15] 陶照堂.摩阻风速的野外测量[J].甘肃科技,2011,27(23):66-69.
- [16] 程宏,邹学勇,张春来.摩阻风速与平均风速的转化关系研究[J].水土保持研究,2007,14(2):133-134.

(上接第 71 页)

- [16] 范海兰,洪伟,吴承祯,等.水分胁迫对短葶山麦冬生长和总皂苷量的影响[J].应用与环境生物学报,2011,17(3):345-349.
- [17] 于锡宏,刘汉兵,惠爱斌,等.不同土壤水分含量对短毛独活生长的影响及其生理响应[J].北方园艺,2018(24):1-7.
- [18] 候双利.不同母质发育红壤的水分运移试验与模拟[D].南京:河海大学,2017.
- [19] 李成亮,何园球,熊又升,等.四种不同母质发育的红壤水分状况研究[J].土壤,2004,36(3):310-317.
- [20] 宋春丽.旱作条件下不同母质红壤磷吸附作用及其影响因素研究[J].中国农学通报,2016,32(2):129-134.
- [21] 李忠佩,刘明,江春玉.红壤典型区土壤中有机质的分解、积累与分布特征研究进展[J].土壤,2015,47(2):220-228.