

塔里木盆地西南缘不同下垫面的摩擦阻 风速和空气动力学粗糙度

周杰^{1,2,3}, 雷加强¹, 郑则浩^{1,2,3}, 毛东雷^{1,2,3}, 薛杰^{1,2,3}

(1. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学,
北京 100049; 3. 新疆策勒荒漠草地生态系统国家野外科学观测试验站, 新疆 策勒 848300)

摘要: [目的] 分析各下垫面摩擦风速和地表空气动力学粗糙度变化特征, 揭示不同下垫面的风蚀潜力大小。[方法] 通过 2010—2012 年野外气象观测, 尝试计算由流动沙漠到绿洲 4 个连续下垫面的摩擦风速和空气动力学粗糙度的变化并分析其变化原因, 评价摩擦风速和空气动力学粗糙度其对风蚀敏感性的影响。[结果] 流动沙地和半流动沙地摩擦风速(u^*)和空气动力学粗糙度(z_0)的年内变化不明显, 固定沙地和绿洲的摩擦风速和空气动力学粗糙度年内变化呈现单调递增变化规律。摩擦风速在流动沙地、半流动沙地、固定沙地和绿洲 4 个下垫面分别为 0.33, 0.44, 0.61, 和 0.81 m/s。空气动力学粗糙度在流动沙地、半流动沙地、固定沙地和绿洲 4 个下垫面分别为 0.39, 13.58, 39.51 和 310.8 mm。[结论] 流动沙地风蚀发生的潜力最大而绿洲风蚀发生的潜力最小。

关键词: 摩擦速度; 空气动力学粗糙度; 风蚀; 绿洲; 固定沙地; 半流动沙地; 流动沙地

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)01-0001-05

中图分类号: X169

文献参数: 周杰, 雷加强, 郑则浩, 等. 塔里木盆地西南缘不同下垫面的摩擦风速和空气动力学粗糙度[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1): 1-5. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.01.001

Friction Wind Velocity and Aerodynamic Roughness Over Different Underlying Surface Types in Southwestern Tarim Basin

ZHOU Jie^{1,2,3}, LEI Jiaqiang¹, ZHENG Zehao^{1,2,3}, MAO Donglei^{1,2,3}, XUE Jie^{1,2,3}

(1. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang Uygur Autonomous Region 830011, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Cele National Station of Observation & Research for Desert-Grassland Ecosystem in Cele, Xinjiang, Xinjiang Uygur Autonomous Region 848300, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to analyze the characteristics of friction wind velocity and aerodynamic roughness over different underlying surface types in order to reveal the wind erosion potential in different underlying surfaces. [Methods] Wind velocity profiles were measured and used to determine friction velocity(u^*) and aerodynamic roughness(z_0) in four different underlying land types in the wind erosion season of 2010—2012. The sensitivity of friction velocity and aerodynamic roughness to wind erosion was analyzed. [Results] The friction velocity and aerodynamic roughness were positively correlated with the canopy height and vegetation coverage. The friction velocity was 0.33, 0.44, 0.61 and 0.81 m/s for the shifting sand dunes, the semi-shifting sand dunes, the fixed sand dunes and the oasis, respectively. While the aerodynamic roughness was 0.39, 13.58, 39.51 and 310.8 mm for the shifting sand dunes, the semi-shifting sand dunes, the fixed sand dunes, and the oasis, respectively. [Conclusion] The shifting sand dunes have the greatest potential for wind erosion, while oases have the least potential for wind erosion.

Keywords: friction wind velocity; aerodynamic roughness; wind erosion; oasis; fixed sand dunes; semi-shifting sand dunes; shifting sand dunes

收稿日期: 2015-01-30

修回日期: 2015-03-06

资助项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项子课题“绿洲外围节水型生物防护体系构建及可持续经营技术开发与示范”(201130106-1)

第一作者: 周杰(1985—), 男(汉族), 陕西省宝鸡市人, 博士研究生, 研究方向为风沙环境。E-mail: desert_zhoujie@163.com。

通讯作者: 雷加强(1960—), 男(汉族), 陕西省高陵县人, 博士, 研究员, 主要从事风沙环境问题的研究。E-mail: desert@ms.xjb.ac.cn。

土壤风蚀是土地沙漠化的首要环节,是危害干旱、半干旱地区最主要的环境问题,同时也是造成土地退化、生产力急剧下降的主要原因。塔里木盆地西南缘是中国最主要风蚀危害区,该地区主要以流动沙地、半流动沙地、固定沙地和绿洲 4 种主要的下垫面组成。强烈的风沙活动以及脆弱的地表状况使得该地区的土壤风蚀现象日趋严重。风蚀已成为当地最主要的自然环境问题。摩阻风速和地表空气动力学粗糙度是影响土壤风蚀的重要因素,通过摩阻风速和空气动力学粗糙度能够判定土壤风蚀潜力的大小^[1-3]。基于此,本研究选取塔里木盆地西南缘流动沙漠—绿洲 4 种典型连续下垫面为研究对象,通过对 4 种下垫面气象数据的常年监测,计算和分析各下垫面摩阻风速和地表空气动力学粗糙度变化特征,来揭示不同下垫面的风蚀潜力大小。

1 研究区概况

策勒县(80°03′24″—82°10′34″E, 35°17′55″—39°30′00″N)位于新疆维吾尔自治区塔克拉玛干沙漠南缘,昆仑山北麓,属典型内陆暖温带荒漠气候,年平均气温 11.9℃,年均降水量为 35.1 mm。盛行西风,频率占 62.43%~76.25%,WNW 风次之,频率占 17.75%^[4],风沙活动频繁,每年 8 级以上大风 3~9 次,多年平均沙尘暴日数为 25.2 d,最多年份高达 59 d^[5]。沙尘暴天气年内分布不均,主要出现在 3—9 月,春夏季多,秋冬季少。在策勒过渡带剖面上(由南向北)形成了骆驼刺、怪柳(花花柴)、芦苇和胡杨植物群落分布格局^[6]。从流沙前沿到半固定沙地、固定沙地 2 m 高年平均风速分别为 2.36, 1.75, 1.6 m/s。流动沙地观测点位于塔克拉玛干沙漠南缘其下垫面地势较为平坦几乎无植被存在。半流动沙地观测点分布有零星怪柳、花花柴和骆驼刺混生群落,地势较为起伏。固定沙地观测点分布有一定盖度的骆驼刺群落,地势相对较为平坦。绿洲观测点位于绿洲内部种植棉花、石榴等植物,外围分布有防风林带,地势平坦为平沙地。

2 研究方法

2.1 数据收集

从 2010 年 7 月到 2012 年 11 月,沿策勒沙漠—绿洲主风向方向,自流沙前沿至绿洲内部依次布置 4 个气象观测站。流动沙地和半流动沙地土壤组成主要为沙子,固定沙地土壤组成非常均匀,以粉砂为主。绿洲内土壤类型主要是沙质土壤和棕色沙漠土。4 个观测点从每年 3 月开始观测风速和温度变化(2010 年观测始于 7 月),风速观测分别为 0.5, 1, 2, 3, 8 和

10 m 这 6 个梯度,温度观测为 3 m 高度。气象观测设备均为美国 HOBO 公司生产,其中观测风速选用三杯风速计(S-WSA-M003, ONSET),观测气温的热敏电阻器(S-TMB-M006, ONSET),数据采集仪器(U30-NRC, ONSET)。

2.2 研究方法

摩阻风速 u^* 是确定地表能否起沙的有力判据,在近地面气层里基本上不随高度发生变化。地表土壤风蚀起沙过程实质上是运动的气流与地表微粒在界面上相互作用的动力过程。对单个土壤微粒来讲,它能否脱离地表决定于所受空气动力和阻力(包括重力和内部黏性力等)的合力^[7-8]。风沙物理学中摩阻风速被用来反映微粒所受空气动力的大小,已有的风蚀起沙观测和试验结果指出,当摩阻风速超过某一阈值(临界摩阻风速)时,粒子便会脱离地面而进入空中,从而发生风蚀^[3]。

空气动力学粗糙度 z_0 是地表上平均风速减小到零的某一高度。它表征地表的空气动力学特征,反映地表对风速减弱作用以及对风沙流的影响,并且是大气边界层湍流属性通量参数化方案中常用的一个参数^[9]。空气动力学粗糙度直接影响沙粒的起动风速,进而影响绝对和相对输沙量。

在风沙科学里,测定摩阻风速最常用方法是空气动力学法,这是一种近似方法:由于壁面湍流的粘性底层和过渡区的厚度都很薄,不考虑黏性底层和过渡区的厚度及其对湍流的影响,并且都是认为在湍流发展充分的核心区,因粘性切应力趋于零而不再考虑均是以雷诺切应力来近似等于壁面切应力这一前提来计算摩阻风速的。空气动力学方法是在上述假设条件下是引入普朗特的混合长度理论假设,得到雷诺应力和平均风速的关系。根据试验观察和量纲分析,普朗特提出固壁附近混合长度与离固壁的距离成正比的经验公式,并引入了卡门常数这一试验参数,得到充分发展的稳态湍流中近壁面的对数律公式。内部边界层内的气流假定完全调整到新的表面,并且风剖面是高度的对数函数^[10]:

$$u_z = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{z-d}{z_0}\right) \quad (1)$$

式中: u_z ——高度 z (m) 处的风速(m/s); k ——冯卡曼常数(0.4); z_0 ——地表粗糙度(m); d ——零平面位移(m)。粗糙度参数与粗糙元素(植被,地表随机粗糙度等)的高度直接相关。如果测量的 3 层或者 4 层高度的风速具有很高的线性度($R^2 > 0.95$),那么这些风速可以说明风速测量在同一边界条件内。是粗糙面十分重要的参数,它指示了被单独粗糙度元

素吸收动量的平均水平。最初 d 基于 h 用下式进行计算^[11]:

$$\lg d = 0.9979 \lg h - 0.154 \quad (2)$$

式中: h ——粗糙元素的高度 d 最后用 $\ln(z-d)$ 和 u_2 的关系进行了修正,当 R^2 最大时,即可以得到最优的 d 。 z_0 最后可以根据 $\ln(z-d)$ 与 u_2 所构成的线性函数的截距得到^[10]。

方程(1)中 u^* 摩擦风速和 z_0 空气动力学粗糙度可以根据中性层结下的风速剖面计算,虽然中性层结普遍发生于高风速情况^[12],但是我们可以依据理查森数来判断^[7]:

$$R_i = \frac{(g/T)(\partial T/\partial z)}{(\partial u/\partial z)^2} \quad (3)$$

式中: R_i ——理查森数; g ——重力加速度(9.8 m/s²); T ——大气温度(K)。Thom^[13] 计算得到中性层结条件下理查森数介于 $-0.01 \sim 0.01$ 之间。

3 结果分析

研究中计算摩擦风速和空气动力学粗糙度的风速数据均来自风速大于 6 m/s 的高风速事件数据^[3],并用理查森数判断某场大风是否是中性条件,不符合中性条件则剔除。最终,共筛选出了流动沙地、半流动沙地、固定沙地和绿洲点的符合计算条件的高风速事件的数量分别为:2010 年分别为 11,5,7,共 3 场,2011 年分别为 21,16,14,共 14 场,2012 年分别为 19,4,7,共 10 场且在计算过程中符合条件的风速事

件在主风向 $W(270^\circ \sim 300^\circ)$ 上所占的比例分别是 2010 年 87%,2011 年 82% 和 2012 年 78%。

3.1 零平面位移高度化

零平面位移高度,取决于地表粗糙元的几何特征。零平面位移高度可以用来估计大粗糙元对近地表气流的干扰程度,对其物理意义有不同的解释。Thom^[13] 认为,对所有类型的粗糙元而言,零平面位移高度是平均动量消失的高度,也有学者将零平面位移高度解释为平均阻力在地表开始作用的高度^[14]。两种解释都表明,零平面位移高度值可用以评价风力对地表的作用效果和粗糙元对地表的保护程度。有鉴于此,零平面位移高度常被用来评价地表风蚀粗糙元对抑制作用的潜在强度。本研究中计算的不同地表类型的大风事件的零平面位移高度。

董治宝等^[15] 观测到非常矮小和稀疏的植被(高度小于 5.0 cm 并且盖度小于 800 nm²)不会产生零平面位移,即零平面高度为 0。与其他 2 个试验点相比,流动沙地和半流动沙地很少或没有粗糙元来吸收动能,因此在最符合 $\ln(z-d)$ 和 $u(z)$ 的线性关系中所计算的零平面位移高度的值为 0。如图 1 所示,固定沙地零平面位移高度为 0.24~0.45 m,平均 0.32 m,随着植被的不断生长(冠幅高度和植被叶片面积的增加),零平面位移高度值的变化可以描述为一个先增后减的单峰曲线,分别在 2011 年 6 月 1 日和 2012 年 5 月 22 日达到最大值。峰值过后由于当地牧民对骆驼刺的大面积收割和放牧零平面位移高度值开始呈下降趋势。

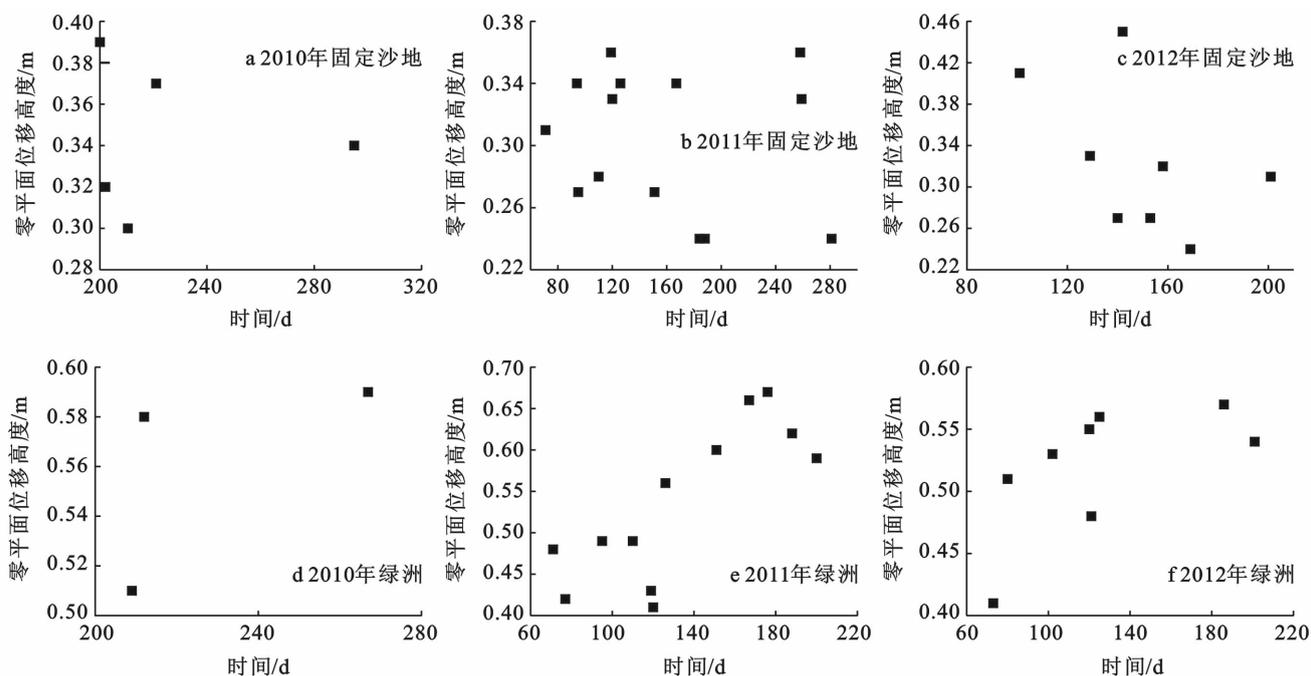


图 1 2010—2012 年在高风速事件过程中固定沙地和绿洲零平面位移高度值变化

而绿洲计算的零平面位移高度为 0.41~0.58 m, 均值 0.56 m。零平面位移高度值的变化规律和固定沙地相类似, 但零平面位移高度大于固定沙地, 且绿洲零平面位移高度的最大值和最小值分布出现在 3 和 8 月。出现这种差异是可能由植被高度对零平面位移高度值的影响, 绿洲生长有较为高大的乔木和经济林作物, 相比之下固定沙地只是生长有低矮的骆驼刺群落。董治宝等^[15]认为植被高度和密度共同影响了零平面位移高度值, 他们的增大使得零平面位移高度值也随之增大。本文研究结果也证实了他的结论。

3.2 摩阻速度 u^* 变化

在整个高风速事件观测期间, 流动沙地摩阻风速为 0.23~0.43 m/s, 平均摩阻风速为 0.32 m/s (标准差 0.02 m/s), 半固定沙地摩阻风速 0.33~0.64 m/s, 平均值 0.51 m/s (标准差 0.05 m/s), 固定沙地

摩阻风速 0.43~0.78 m/s, 平均值 0.63 m/s (标准差 0.05 m/s), 绿洲摩阻风速 0.63~0.98 m/s, 平均值 0.79 m/s (标准误差 0.05 m/s) (图 2)。4 个试验点中绿洲点摩阻风速最大, 流动沙地最小, 这两个试验点结果的差异性反映了 2 个试验区不同的粗糙度特征: 绿洲点生长有高大植被和农作物而流动沙地只分布有零星灌丛植被群落。Copeland 等^[16]认为对比与裸沙地, 有植被的地表粗糙度的增大是因为地表土壤的不可蚀元素导致了摩阻风速的增大。流动沙地很少或者几乎没有有植被存在, 因此该试验区的摩阻风速也最低, 相比之下绿洲摩阻风速最大, 其原因可能是绿洲内植被林冠的多孔结构增加了地表的摩擦。半固定沙地和固定沙地摩阻风速较低, 这可能是由于半固定沙地和固定沙地地表生长相对稀疏和和低矮的植被的影响。

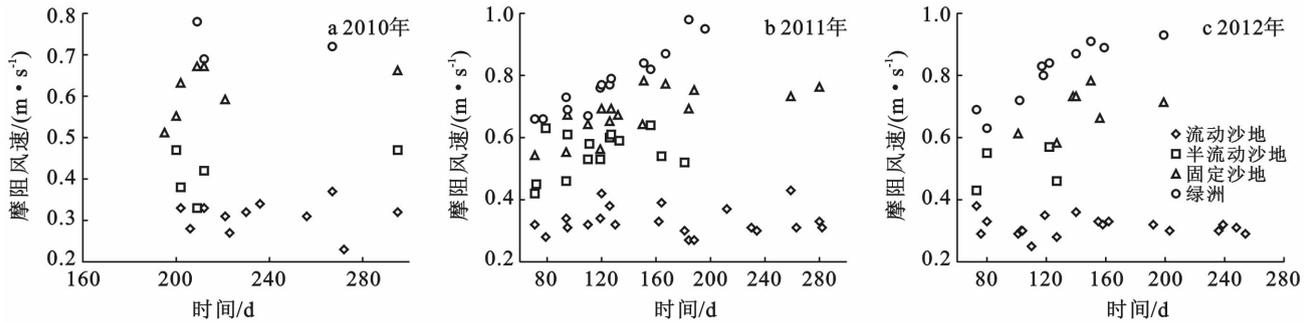


图 2 2010—2012 年在高风速时间过程中 4 个下垫面的摩阻风速变化

风速与摩擦速度成线性关系, 随着风速的增大, 摩阻风速也增大, 但增大的速度有所不同^[17]。在塔里木盆地西南缘每年 3 月中旬会出现一场沙尘暴天气, 例如 2011 年 3 月 20 日流动沙地、半固定沙地和固定沙地的摩阻风速值异常的大, 这些异常值分别为 0.36, 0.53, 0.62 m/s, 这主要是因为异常的高风速事件导致了摩阻风速的增大, 此次大风事件中 3 m 高度风速平均值分别为流动沙地 11.52 m/s, 半流动沙地 10.61 m/s, 固定沙地 9.23 m/s。3 月 20 日后除流动沙地外其余 3 个下垫面基本都出现先减小再增大趋势, 摩阻风速减小是因为后来发生的高风速事件相对于第一场沙尘暴过程的极端高风速事件其风速较小造成的, 随后的增大说明了下垫面植被在正常生长过程中因树冠对动能的吸收, 以及地表粗糙度的增加导致摩阻风速增大, 而流动沙地因很少或几乎没有植被盖度摩阻风速变化幅度不是很明显。

3.3 空气动力学粗糙度 Z_0 变化

在整个高风速事件中流动沙地粗糙度为 0.12~1.37 mm, 半流动沙地 6.92~23.72 mm, 固定沙地 14.8~106.8 mm, 绿洲 189.6~633.8 mm (图 3)。绿

洲粗糙度最大, 整个高风速事件过程中平均值为 310.8 mm (标准差 73.5 mm), 流动沙地粗糙度最低, 整个高风速事件过程中平均值为 0.39 mm (标准差 0.11 mm)。半流动沙地和固定沙地平均值分别为 13.58 mm (标准差 4.5 mm) 和 9.51 (标准差 5.6 mm)。在整个高风速事件中只有绿洲的粗糙度变化幅度较大, 且 8 月中旬达到峰值。其他 3 个试验点除固定沙地有少许变化外, 半流动沙地和流动沙地基本没变化, 造成这种差异的原因可能是因为绿洲内分布有乔、灌、草 3 种不同高度相结合的植被而其他 3 个试验点只分布有低矮灌木或者少有植被分布。

植被生长和下垫面状况直接的影响粗糙度变化, 许多前人研究也表明植被高度影响粗糙度大小^[18-19]因此我们推论相似的下垫面状况和植被生长状况粗糙度大小基本相同。Jasinski 等^[20]计算得到林地的粗糙度为 1.2 m, Lloyd 等^[21]观测到的灌丛堆的粗糙度大小为 1.45 m, 这与本文中绿洲粗糙度值相似。Kenneth 等^[22]计算 3 种半荒漠区灌丛群落的粗糙度为 10~70 mm 这与本文中固定沙地的粗糙度基本相同。Ishizuka 等^[23]计算的塔克拉玛干沙漠的粗糙度为 2.67

mm。与本文中计算的流动沙地下垫面的粗糙度非常接近,并且我们的结果符合 Oke^[12] 的研究即水平裸露地表的粗糙度的范围为 1~10 mm。Toure 等^[24] 认

为空气动力学粗糙度能够反映该地表类型的土壤风蚀的潜力,鉴于此,我们的研究结果表明,流动沙区发生风蚀的潜力最大,绿洲发生的风蚀潜力最小。

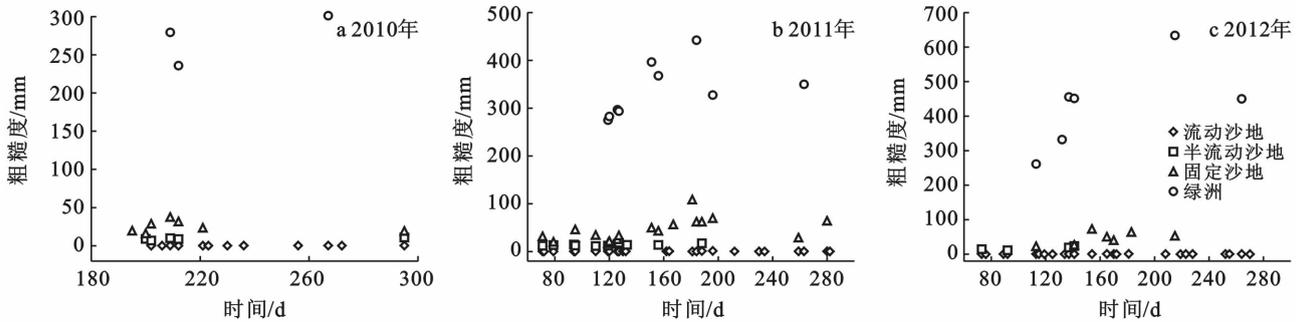


图 3 2010—2012 年在高风速事件过程中 4 个下垫面的空气动力学粗糙度变化

4 结论

塔里木盆地西南缘是中国西北地区最主要的风蚀危害区,文章通过对影响塔里木盆地南缘 4 种下垫面地表风蚀潜力的空气动力学参数 u^* 和 z_0 的计算,得出各下垫面 u^* 依次为:流动沙地<半流动沙地<固定沙地<绿洲;各下垫面粗糙度依次为:流动沙地<半流动沙地<固定沙地<绿洲。空气动力学参数直接受地表状况影响且摩擦风速和空气动力学粗糙度随植被冠幅高度和盖度增大而增大。Sharratt 和 Feng^[3] 通过对翻耕和传统耕作两种不同土地利用方式对摩擦风速和空气动力学粗糙度的变化观测表明翻耕下的摩擦风速和粗糙度均大于传统耕作方式,这主要是由于翻耕破坏了地表土壤状况增加了地表粗糙度。此外摩擦风速和粗糙度值在植被生长早起阶段低于植被生长后期,这主要是由于生长后期植被叶片面积和植被盖度的增大导致。最后综合各下垫面的摩擦风速和粗糙度变化表明流动沙地的地表风蚀潜力最大而绿洲风蚀潜力最小。

[参 考 文 献]

[1] 胡霞,刘连友,严平,等. 不同地表状况对土壤风蚀的影响[J]. 水土保持研究,2006,13(4):116-119.
 [2] Hagen L J. Crop residue effects on aerodynamic processes and wind erosion[J]. Theoretical and Applied Climatology, 1996,54(1/2):39-46.
 [3] Sharratt B, Feng Guanglong. Friction velocity and aerodynamic roughness of conventional and undercutter tillage within the Columbia Plateau, USA [J]. Soil and Tillage Research, 2009,105(2):236-241.
 [4] 邢文娟,雷加强,王海峰,等. 荒漠—绿洲过渡带风况及输沙势分析:以策勒县为例[J]. 干旱区研究,2008,25(6):894-897.

[5] 李向义,张希明,何兴元,等. 沙漠—绿洲过渡带四种多年生植物水分关系特征[J]. 生态学报,2004,24(6):1164-1171.
 [6] 代述勇,雷加强,赵景峰,等. 策勒西部荒漠—绿洲过渡带地下水特征及生态影响分析[J]. 干旱区资源与环境,2009,23(8):99-103.
 [7] Stull R B. Meteorology for Scientists and Engineers: A Technical Companion Book with Ahrens' Meteorology Today[M]. Brooks/Cole, 2000.
 [8] Sharratt B S, Vaddella V. Threshold friction velocity of soils within the Columbia Plateau[J]. Aeolian Research, 2012,6(2):13-20.
 [9] 刘小平,董治宝. 空气动力学粗糙度的物理与实践意义[J]. 中国沙漠,2003,23(4):337-346.
 [10] Campbell G S, Norman J M. An introduction to environmental biophysics[M]. Germany: Springer,1998.
 [11] Stanhill G. A simple instrument for the field measurement of turbulent diffusion flux[J]. Journal of Applied Meteorology, 1969,8(4):509-513.
 [12] Oke T R. Boundary layer climates[M]. London: Psychology Press, 1987.
 [13] Thom A S. Momentum, mass and heat exchange of plant [J]. Communities Vegetation and the Atmosphere, 1975(1):57-109.
 [14] Jackson P S. On the displacement height in the logarithmic velocity profile[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1981(111):15-25.
 [15] Dong Z, Gao S, Fryrear D W. Drag coefficients, roughness length and zero-plane displacement height as disturbed by artificial standing vegetation[J]. Journal of Arid Environments, 2001,49(3):485-505.
 [16] Copeland N S, Sharratt B S, Wu J Q, et al. A Wood-Strand Material for Wind Erosion Control: Effects on Total Sediment Loss, PM Vertical Flux, and PM Loss [J]. Journal of Environmental Quality, 2009,38(1):139-148.

- 价[D]. 重庆:西南农业大学,2004.
- [6] 王育红,姚宇卿. 残茬和秸秆覆盖对黄土坡耕地水土流失的影响[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(4):109-11.
- [7] 林超文,罗春燕,庞良玉,等. 不同耕作和覆盖方式对紫色丘陵区坡耕地水土及养分流失的影响[J]. 生态学报,2010,30(22):6091-6101.
- [8] 向达兵,雍太文,杨文钰,等. 不同种植模式对西南坡地水土保持及作物产值的影响[J]. 应用生态学报,2010,21(6):1461-1467.
- [9] 刘立晶,高焕文,李洪文. 秸秆覆盖对降雨入渗影响的试验研究[J]. 中国农业大学学报,2004,9(5):12-15.
- [10] Doring T F, Brandt M, He β J, et al. Effects of straw mulch on soil nitrate dynamics, weeds, yield and soil erosion in organically grown potatoes[J]. *Field Crops Research*, 2005,94(2/3):238-249.
- [11] Holt R,卫中平. 作物秸秆土壤侵蚀与植物养分之间的关系[J]. 水土保持科技情报,1991(1):33-36.
- [12] Edwards L, Burney J R, Richter G, et al. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2000,81(3):217-22.
- [13] Edwards L M, Volk A, Burney J R. Mulching potatoes: Aspects of mulch management systems and soil erosion[J]. *American journal of potato research*, 2000, 77(4):225-232.
- [14] 唐涛,郝明德,单凤霞. 人工降雨条件下秸秆覆盖减少水土流失的效应研究[J]. 水土保持研究,2008,15(1):9-11.
- [15] 张展. 用作物秸秆减小涌灌对土壤的侵蚀[J]. 水利科技与经济,1996,2(3):147-151.
- [16] 郑子成,吴发启,何淑潮,等. 地表糙度对径流和产沙影响的室内试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(10):19-24.
- [17] 代数,蒋光毅,夏清,等. 坡度和雨强对重庆市黄壤旱坡地产流产沙特征的影响[J]. 水土保持学报,2011,25(4):1-5.
- [18] 杨晓芬,吴发启,马波,等. 黄土坡耕地玉米作物的防蚀作用研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2012,40(10):97-102.
- [19] 张岩,刘宝元,史培军,等. 黄土高原土壤侵蚀作物覆盖因子计算[J]. 生态学报,2011,21(7):1050-1056.
- [20] Renschler C S, Mannaerts C, Diekkrüger B. Evaluating spatial and temporal variability in soil erosion risk-rainfall erosivity and soil loss ratios in Andalusia, Spain [J]. *Catena*, 1999,34(3/4):209-225.

(上接第 5 页)

- [17] 茅宇豪,刘树华,李婧. 不同下垫面空气动力学参数的研究[J]. 气象学报,2006,64(3):325-334.
- [18] Counihan J. Wind tunnel determination of the roughness length as a function of the fetch and the roughness density of three-dimensional roughness elements [J]. *Atmospheric Environment*, 1971,5(8):637-642.
- [19] 夏建新,石雪峰,吉祖稳,等. 植被条件对下垫面空气动力学粗糙度影响试验研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2007,15(1):23-31.
- [20] Jasinski M F, Crago R D. Estimation of vegetation aerodynamic roughness of natural regions using frontal area density determined from satellite imagery[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1999,94(1):65-77.
- [21] Lloyd C R, Gash J H C, Sivakumar M V K. Derivation of the aerodynamic roughness parameters for a Sahelian savannah site using the eddy correlation technique[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1992,58(3):261-271.
- [22] Kenneth L D, William A W R. Aerodynamic roughness parameters for semi-arid natural shrub communities of Wyoming. USA [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997,88(1):1-14.
- [23] Ishizuka M, Mikami M, Yamada Y, et al. Threshold Friction Velocities of Saltation Sand Particles for Different Soil Moisture Conditions in the Taklimakan Desert[J]. *Sola*, 2009(5):184-187.
- [24] Toure A A, Rajot J L, Garba Z, et al. Impact of very low crop residues cover on wind erosion in the Sahel [J]. *Catena*, 2001,85(3):205-214.