doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.04.021

残茬覆盖地表空气动力学粗糙度变化规律*

赵永来[1]　麻硕士[2]　陈　智[2]　孙悦超[1]　王荣莲[3]

(1.内蒙古农业大学职业技术学院，包头 014109；2.内蒙古农业大学机电工程学院，呼和浩特 010018；
3.内蒙古水利科学研究院，呼和浩特 010019)

摘要：利用移动式风蚀风洞对燕麦留茬覆盖农田空气动力学粗糙度进行了测试与分析。结果表明，空气动力学粗糙度在给定风速下随残茬覆盖宽度增大而增大，下风向地表风速较上风向风速有所降低；当残茬覆盖宽度达到5 m后，地表的空气动力学粗糙度出现一个极值，此后随覆盖宽度的继续增加，其空气动力学粗糙度增幅微弱；空气动力学粗糙度随着摩阻风速的增大而增大，其增幅大于摩阻风速的增幅，说明宽度适宜的残茬覆盖地表能消弱侵蚀力，在空气动力学粗糙度和摩阻风速两因素中，空气动力学粗糙度的变化对侵蚀力的影响更显著。

关键词：残茬覆盖　空气动力学粗糙度　摩阻风速　风蚀风洞　变化规律

中图分类号：S151^{+}.1；S155.4^{+}7　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2013)04-0118-05

Variational Rule of Aerodynamic Roughness under Crop Stubble Coverage

Zhao Yonglai[1]　Ma Shuoshi[2]　Chen Zhi[2]　Sun Yuechao[1]　Wang Ronglian[3]

(1. *Vocational and Technical College*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Baotou* 014109, *China*
2. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Inner Mongolia Agricultural University*, *Huhhot* 010018, *China*
3. *Inner Mongolia Institute of Water Resources Research*, *Huhhot* 010019, *China*)

Abstract: The test and analysis were conducted on oat crop stubble coverage farmland by means of the movable wind tunnel. The result showed that aerodynamic roughness increased with the increasing of crop stubble coverage width under the given velocities. The field surface velocity of windward reduced to less than that of leeward. The field surface aerodynamic roughness showed an extreme value when crop stubble coverage width reached to 5 m. Its increasing amplitude grew minuteness with increasing of crop stubble coverage width. Aerodynamic roughness increased with increasing of friction wind velocity and its increasing amplitude more than that of friction wind velocity. In conclusion, crop stubble coverage with reasonable width could reduce near surface shear stress. Compare with friction wind velocity, the effect of aerodynamic roughness on near surface shear stress was found to be more obvious.

Key words: Crop stubble coverage　Aerodynamic roughness　Friction wind velocity　Erosion wind tunnel　Variational rule

引言

风沙物理学在研究空气动力学粗糙度方面已经取得了重要成果。空气动力学粗糙度已被广泛用于表征各种地表类型。土壤风蚀是近地表气流与地表土壤物质之间相互作用的结果，残茬覆盖是抑制土壤风蚀的重要措施之一[1~5]。植被对气流的影响和对地表的保护作用主要是通过增大空气动力学粗糙度、提高摩阻速度来实现的[6]。Wolfe等研究认为植被覆盖能提高地表空气动力学粗糙度、降低风速和阻挡沙尘，对地表起到保护作用[7~13]。董治宝等通过风洞研究发现，随着植被覆盖度的增加，土壤风

收稿日期：2012-02-20　修回日期：2012-04-05

*国家自然科学基金资助项目(41161045、40861013)和内蒙古自治区自然科学基金资助项目(2010BS0607)

作者简介：赵永来，副教授，主要从事农牧业机械性能测试与控制研究，E-mail：zhaoyonglai@126.com

通讯作者：陈智，教授，主要从事保护性耕作与环境控制技术研究，E-mail：chz6653@sohu.com

蚀率急剧下降[14]。刘晓冰等研究显示农作物秸秆覆盖不仅可以减少风蚀，还可以增加土壤养分[15]。这些研究的重点多数是农田的抗风蚀效果[16~20]，对空气动力学粗糙度的变化以及其与摩阻风速关系的研究还不足。空气动力学粗糙度是反映下垫面空气动力学特征的重要物理量，摩阻风速是气流对床面剪切力的反映，是研究植被与大气间能量、物质交换过程中首先要确定的基本参数，也是影响土壤风蚀的重要参数。本文利用移动式风蚀风洞野外原位测试方法，通过燕麦残茬覆盖地表覆盖宽度状况的变化测试分析空气动力学粗糙度的变化规律。进一步揭示残茬覆盖对于下垫面空气动力学粗糙度的影响因素，为阴山北麓农牧交错区的风蚀防治提供技术支持。

1　材料和方法

1.1　试验地点

试验地点位于内蒙古自治区武川县上秃亥乡保护性耕作项目区，该区属于典型的农牧交错带，是阴山北麓旱作耕地。气候特点为春季干燥、季风强烈，夏季短促，冬季严寒，全年月平均风速为 4.5 m/s，4~5 月份风速最大，月均风速可达 6 m/s。项目区主要农作物有小麦、燕麦、马铃薯和油菜等，适宜栽培一年一熟小日期农作物[21~22]。项目区的保护性耕作农田耕作带与间作翻耕带宽度均为 8 m，保护性耕作带残茬高度 27~37 cm，行间距 20 cm。对照秋翻地紧邻项目区东侧，多年采用传统耕作方式实施秋翻，保护性耕作农田位于项目区西侧，连续 4 年实施保护性耕作种植小麦和燕麦。

1.2　试验设备

试验设备为 0FDY－1.2 型直流吹气可移动式风蚀风洞和配套的风速测试控制系统（图 1）。通过室内模拟和野外草地、农田等多种原位地表空气动力学相似性试验证明，该风洞相似性满足旱作农田、草地等空气动力学测试要求。风洞由过渡段、整流段、收缩段和试验段组成，试验段长 7.2 m、宽 1.0 m、高 1.2 m，气流速度不均匀性小于 1%，紊流度小于 1.5%，轴向静压梯度小于 0.005 Pa。风速在 0~20 m/s内无级可调。经中国科学院旱区环境与工程研究所鉴定，该风洞结构符合低速风洞的设计要求，在试验段能够模拟自然风，产生自由旋涡气流和稳定流动的气流场；试验段的风速廓线与真实地表自然风速廓线基本一致[23~24]。

1.3　研究方法

待测地表为保护性耕作燕麦留茬覆盖地，留茬高度为 30 cm，行距为 20 cm，经 10 次测得的平均残

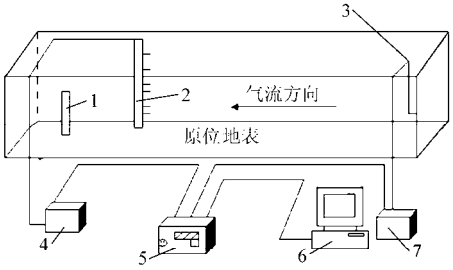

图 1　风洞试验布置图

Fig. 1　Testing layout diagram of movable wind tunnel

1. 集沙仪　2. 风速廓线仪　3. 风速皮托管　4. 压差传感器　5. 数据采集器　6. 计算机　7. 压差传感器

茬覆盖度（各植物单体在所测地表的投影面积总和与土壤表面总面积的比）为 90%。测得距地表 5 cm 内土壤含水率为 12.03%。试验时，将风洞直接放置在保护性耕作燕麦留茬地表，风洞轴线与垄向垂直。设计距风洞试验段气流进口位置分别为 2.8、3.2、4.0、4.8、5.6、6.0、6.4、6.8、7.2 m 共 9 个位置作为测试点（以 T1~T9 表示），风洞中心风速分别以设计的 6、9、12、15、18 m/s 进行吹蚀。风速由皮托管测速装置来测定，皮托管通过微压差传感器与计算机连接，试验时将气温与大气压输入计算机，实现风速实时自动采集，采集后通过数据采集卡传给以 LabWindows/CVI 作为平台开发的数据采集软件，并显示、记录、保存于计算机中。选距地表 25、50、100、200、300、398、500、600、795 mm 共 9 个高度作为风速采集点。根据气温和风速廓线数据利用最小二乘法拟合的方法分别计算平均摩阻风速和空气动力学粗糙度。考虑到测点位置前、后残茬对测试风速的影响，试验时采取向风洞试验段气流进口位置逐渐推进拔茬的方式，为了确保测试系统数据的可靠采集，风速的采集时间设计为 10 min，试验结果为测试 5 次的平均值。

1.4　空气动力学粗糙度和摩阻风速的确定方法

空气动力学粗糙度 Z_0 是地表上平均风速为零的高度，可反映下垫面对气流运动的摩擦阻力，是定量评价近地表空气动力学性质和防风效益的重要参数。本文试验数据是在大气层结呈中性或接近中性稳定的条件下测试所得。由流体力学计算公式，其地表风速廓线可表达为

$$U_Z = \frac{U_*}{K}\ln\frac{Z}{Z_0} \tag{1}$$

其中　$U_* = (\tau/\rho)^{1/2}$

式中　U_*——摩阻风速　　ρ——空气密度

τ——地面剪切力或阻力

K——冯卡曼常数，取 0.4

Z——距地表高度

U_Z——高度 Z 处的风速

运用 Matlab 7.0 软件，根据测试结果由最小二乘法拟合所得风速廓线方程为

$$U_Z = A + B\ln Z \tag{2}$$

式中 A、B——回归系数

根据空气动力学粗糙度的定义，在式(1)中，令 $U_Z = 0$ 可求出

$$Z_0 = \exp(-A/B) \tag{3}$$

此方法与 Wiggs 等[25]研究 Kalahari 沙漠西南部植被覆盖部分线性沙丘的空气动力学特征所使用的方法相同。由式(1)和式(3)得出摩阻风速的计算方程为

$$U_* = KB \tag{4}$$

严格地说，一定地表条件下空气动力学粗糙度并不是一个常数，其值随着风速而变化。因此，必须在同一风速下测定不同覆盖状况地表的空气动力学粗糙度，以分析不同残茬覆盖宽度对空气动力学粗糙度的影响。

2 结果分析

2.1 空气动力学粗糙度随距风洞试验段进口位置的变化

试验中测定了各测点空气动力学粗糙度随距风洞试验段气流进口位置的变化规律(图2)。

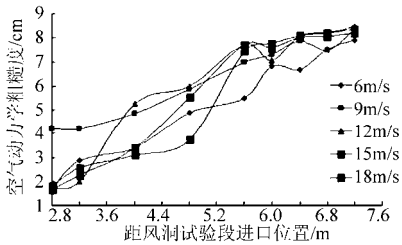

图2 不同风速下空气动力学粗糙度与距风洞试验段气流进口位置的关系

Fig. 2 Relationship between aerodynamic roughness length and distance from wind tunnel working section entrance location at different wind velocities

研究表明，空气动力学粗糙度随距风洞试验段气流进口位置距离的增加而呈现增大趋势。测点 T1 和 T2 处，空气动力学粗糙度最大值出现在 9 m/s 风速，测点 T3 和 T4 处的最大值出现在 12 m/s，测点 T5 处的最大值出现在 15 m/s，T6 ~ T9 处的最大值均出现在 18 m/s；测点 T1 ~ T9 空气动力学粗糙度最大值较最小值的增幅分别为：60.14%、52.37%、35.67%、37.74%、28.39%、12.02%、17.17%、8.53% 和 5.16%。说明距离风洞试验段进口位置越远，近地表气流对地表的摩擦阻力越大，空气动力学粗糙度也相应增大。可见保护性耕作带宽度增加引起空气动力学粗糙度的增大，是导致下风向较上风向处近地表风速降低的原因，是合理确定保护性耕作带带宽与防治农田土壤风蚀的机制所在。

2.2 空气动力学粗糙度随风速的变化

研究表明，测点 T1 ~ T4 处的空气动力学粗糙度随风洞中心风速的增大呈现出先增大后减小的趋势(图3)。

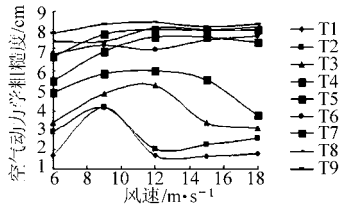

图3 各测点处空气动力学粗糙度与风速的关系

Fig. 3 Relationship between aerodynamic roughness length of various sampling points and wind velocity

当地表残茬覆盖宽度较小时，增加残茬覆盖宽度可以迅速增加地表空气动力学粗糙度，但当地表残茬覆盖宽度达到某一值时，空气动力学粗糙度的增加相对缓慢甚至呈现降低趋势，此时地表残茬覆盖宽度就是对保护性耕作农田防风治沙效果要求的最小耕作带宽度。另外，在自然条件下，残茬的茎秆在风中倒伏时可以认为是产生上述规律的主要原因，通过对流场的分析，认为随着风速的增加风洞内部湍流增强，在一定程度上降低了植被的挡风效果[26]，从而使垂直高度上的风速梯度增加，压缩了风速为零的高度，造成风速零平面位移高度下降，导致空气动力学粗糙度随风速的增加而减少。因此，可以得出增加保护性耕作带宽可以增加床面的空气动力学粗糙度，进而提高床面的抗风蚀能力。

以 15 m/s 为例，T1 ~ T4 4 个测点处较 T5 处的空气动力学粗糙度分别降低了 78.75%、70.76%、55.74%、27.82%。T6 ~ T9 4 个测点处较 T5 处的空气动力学粗糙度分别增加了 1.39%、4.10%、4.59%、6.19%。表明当距风洞试验段气流进口距离达到 5 m 以上时，地表的空气动力学粗糙度随风速的变化趋于平缓，达到一个较为稳定的水平。说明在一定的残茬覆盖条件下，地表的空气动力学粗糙度随覆盖宽度的增加有一个极值，随着覆盖宽度的逐渐增大，空气动力学粗糙度逐渐接近于该极值，此后残茬覆盖宽度增加，空气动力学粗糙度均变化不大。

2.3 空气动力学粗糙度随摩阻风速的变化

摩阻风速是对因地面摩擦阻力而产生风速梯度的衡量，风力越强，地面阻力越大。从物理意义来看，摩阻风速是具有一定几何粗糙度地表通过吸收

边界层气流切应力传递的部分动量。表土可蚀性组分吸收风动量的变化将引起摩阻风速的变化，因而由地表几何粗糙度产生的空气动力学粗糙度是影响摩阻风速的主要因素。

研究表明，各测点的空气动力学粗糙度都随着摩阻风速的增大而增大（图 4）。总体看来，空气动力学粗糙度与摩阻风速都随测点位置距风洞试验段气流进口位置的增大而呈现出增大趋势。其中，空气动力学粗糙度的增幅略显著。在测点 T5 前增幅明显，在 T5 位置达到一个极值点。以 12、15 m/s 为例（图 5），测点 T1 ~ T5，空气动力学粗糙度和摩阻风速的平均增幅分别为 81.56%、31.41% 和 87.57%、38.76。测点 T5 ~ T9，平均增幅分别为 15.87%、-3.66% 和 17.29%、-6.61%，增幅为负表明测点 T5 ~ T9 摩阻风速的增值略减甚至降低。说明宽度适宜的残茬覆盖地表能消弱侵蚀力，在空气动力学粗糙度和摩阻风速两因素中，前者的变化对侵蚀力的影响显著。这是由于随着残茬覆盖宽度的增大，残茬对应的空气动力学粗糙度超过风蚀上限的数值，发生风蚀的可能性减小，由于地表覆盖残茬宽度增大而导致空气动力学粗糙度和摩阻风速的增大，同时残茬覆盖宽度的增大，相当于地表增加了新的粗糙元，它们消耗了部分的风动量，提高了摩阻风速[27]。随着风速的继续增大，由于直立残茬茎秆的倒伏使得边界气流层切应力增大从而导致空气动力学粗糙度和摩阻风速出现增幅降低甚至变为负值的现象。

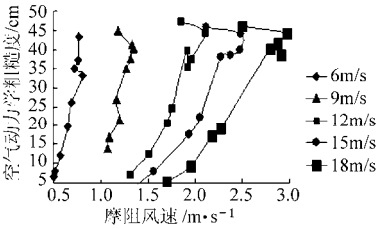

图 4　不同风速下各测点处空气动力学粗糙度与摩阻风速的关系

Fig. 4　Relationship between aerodynamic roughness length of various sampling points and friction wind velocity

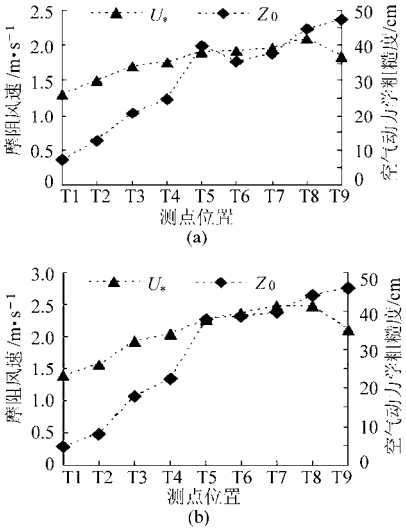

图 5　各测点处的摩阻风速和空气动力学粗糙度

Fig. 5　Friction wind velocity and aerodynamic roughness of various sampling points

（a）中心风速 12 m/s　（b）中心风速 15 m/s

3　结论

（1）空气动力学粗糙度在给定风速下均随残茬覆盖宽度的增大而增大，从而导致下风向地表风速较上风向风速降低，这是合理确定保护性耕作带带宽与防治农田土壤风蚀的机制所在。

（2）当残茬覆盖宽度达到 5 m 后，地表的空气动力学粗糙度出现极值，随着覆盖宽度增大，地表空气动力学粗糙度逐渐接近于该极值，此后随覆盖宽度的增加，空气动力学粗糙度增幅微弱。

（3）空气动力学粗糙度随着摩阻风速的增大而增大，在空气动力学粗糙度和摩阻风速两因素中，前者的变化对侵蚀力的影响显著。直立残茬茎秆的倒伏使得边界气流层切应力增大，导致空气动力学粗糙度和摩阻风速出现增幅降低的现象。

参　考　文　献

1　Bagnold R A. The physics of blown sand and desert Dunes[M]. New York: Methuen, 1941: 85 ~ 95, 265.

2　刘小平，董治宝. 砾石床面的空气动力学粗糙度[J]. 中国沙漠，2003，23(1)：38 ~ 45.
Liu Xiaoping, Dong Zhibao. Aerodynamic roughness of gravel beds[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(1): 38 ~ 45. (in Chinese)

3　张春来，邹学勇，董光荣，等. 耕作土壤表面的空气动力学粗糙度及其对土壤风蚀的影响[J]. 中国沙漠，2002，22(5)：473 ~ 475.
Zhang Chunlai, Zou Xueyong, Dong Guangrong, et al. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influence on soil erosion by wind in a wind tunnel[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(5): 473 ~ 475. (in Chinese)

4　Charnock H. Wind stress on water surface[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1955, 81(350): 639 ~ 640.

5　Chamberlain A C. Roughness length of sea, sand and snow[J]. Boundary-layer Meteorology, 1983, 25: 405 ~ 409.

6　黄富祥，王明星，王跃思. 植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J]. 植物生态学报，2002，26(5)：627 ~ 633
Huang Fuxiang, Wang Mingxing, Wang Yuesi. Recent progress on the research of vegetation protection in soil erosion by wind[J]. Acta Phytoecologica Sinica, 2002, 26(5): 627 ~ 633. (in Chinese)

7 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.

8 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 阴山北麓干旱半干旱区地表土壤风蚀测试与分析[J]. 农业工程学报,2007,23(12):1 ~ 5.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Test and analysis of wind erosion of land surface soil in arid and semi-arid regions in north areas of Yinshan mountain[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(12):1 ~ 5. (in Chinese)

9 秦红灵,高旺盛,马月存,等. 免耕条件下农田休闲期直立作物残茬对土壤风蚀的影响[J]. 农业工程学报,2008,24(4):66 ~ 71.
Qin Hongling, Gao Wangsheng, Ma Yuecun, et al. Effect of standing crop stubble on soil erosion by wind under no-tillage[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(4):66 ~ 71. (in Chinese)

10 Hupy J P. Influence of vegetation cover and crust type on wind-blown sediment in a semi-arid climate[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 58(2):167 ~ 179.

11 Liu M X, Wang J A, Yan P, et al. Wind tunnel simulation of ridge-tillage effects on soil erosion from cropland[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 90(2):242 ~ 249.

12 冯晓静,高焕文,王丽洁,等. 北京周边典型农田风蚀风洞试验与防治分析[J]. 农业机械学报,2008,39(7):64 ~ 67.
Feng Xiaojing, Gao Huanwen, Wang Lijie, et al. Wind erosion experiment and countermeasures on typical farmlands around Beijing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7):64 ~ 67. (in Chinese)

13 赵永来,麻硕士,陈智. 直立植被抗风蚀性能的测试与评价[J]. 农机化研究,2007,29(3):107 ~ 110.
Zhao Yonglai, Ma Shuoshi, Chen Zhi. The measure and evaluation on the anti-wind erosion properties of standing vegetation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(3):107 ~ 110. (in Chinese)

14 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(2):1 ~ 8.
Dong Zhibao, Chen Weinan, Li Zhenshan, et al. The laboratory study on the role of vegetation in soil erosion by wind[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1996, 2(2):1 ~ 8. (in Chinese)

15 刘晓冰,宋春雨,Stephen J H. 覆盖作物的生态效果[J]. 应用生态学报,2002,13(3):365 ~ 368.
Liu Xiaobing, Song Chunyu, Stephen J H. Ecological effects of cover crops[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(3):365 ~ 368. (in Chinese)

16 陈智,麻硕士,范贵生,等. 麦薯带状间作农田地表土壤抗风蚀效应研究[J]. 农业工程学报,2007,23(3):51 ~ 54.
Chen Zhi, Ma Shuoshi, Fan Guisheng, et al. Effect of wind erosion resistance of soil for wheat and potato strip intercropping farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(3):51 ~ 54. (in Chinese)

17 何文清,赵彩霞,高旺盛,等. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究[J]. 应用生态学报,2005,16(11):2 092 ~ 2 096.
He Wenqing, Zhao Caixia, Gao Wangsheng, et al. Main affecting factors of soil wind erosion under different land use patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(11):2 092 ~ 2 096. (in Chinese)

18 高旺盛,秦红灵,赵沛义. 内蒙古阴山北麓干旱区不同种植模式对农田风蚀的影响[J]. 水土保持研究,2005,12(5):122 ~ 125.
Gao Wangsheng, Qin Hongling, Zhao Peiyi. The effects of different planting modes on wind erosion from cropland in arid region of north of Yin mountain of Inner Mongolia[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(5):122 ~ 125. (in Chinese)

19 赵永来,陈智,孙悦超,等. 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):38 ~ 42.
Zhao Yonglai, Chen Zhi, Sun Yuechao, et al. Testing on anti-wind erosion effect of soil for crop stubble coverage farmlands[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):38 ~ 42. (in Chinese)

20 Hill P R. Use of continuous no-till and rotational tillage systems in the central and northern corn belt[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 56(4):286 ~ 290.

21 郑大伟,妥德宝,王砚田. 内蒙古阴山北麓旱农区综合治理与增产配套技术[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社,2000:3 ~ 15.

22 赵永来,陈智,孙悦超,等. 阴山北麓农牧交错区保护性耕作带地表抗风蚀能力的测试与分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2011,39(4):147 ~ 151.
Zhao Yonglai, Chen Zhi, Sun Yuechao, et al. Testing analysis on anti-erosion capability of conservation tillage strip surface in agro-pastoral mixed regions of Yinshan mountain[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2011, 39(4):147 ~ 151. (in Chinese)

23 陈智,郭旺,宣传忠,等. 热膜式无线风速廓线仪[J]. 农业机械学报,2012,43(9):99 ~ 102,110.
Chen Zhi, Guo Wang, Xuan Chuanzhong, et al. Wireless hot-film wind speed profiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9):99 ~ 102, 110. (in Chinese)

24 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 旱作农田近地表风沙运动与防风蚀效果[J]. 农业机械学报,2011,42(1):54 ~ 58.
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. Drought farmland near surface blown sand and wind erosion controlling effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(1):54 ~ 58. (in Chinese)

25 Wiggs G F S, Livinstone L G, Thomas D S, et al. Air flow and roughness characteristics over partially vegetated linear dunes in the southwest Karahari Desert[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1):19 ~ 34.

26 赵永来,麻硕士,陈智,等. 保护性耕作农田对近地表风速阻挡效果分析[J]. 农业工程学报,2011,27(10):33 ~ 38.

27 梅凡民,王涛,张小曳,等. 阴山以北沙漠化地区表土的起动摩阻风速[J]. 纺织高校基础科学学报,2006,19(3):264 ~ 270.