

# 作物残茬覆盖农田地表土壤抗风蚀效应试验<sup>\*</sup>

赵永来<sup>1</sup> 陈智<sup>2</sup> 孙悦超<sup>1</sup> 王荣莲<sup>3</sup>

(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. 内蒙古自治区水利科学研究院, 呼和浩特 010019)

**【摘要】** 采用野外移动式风蚀风洞原位测试方法,对阴山北麓农牧交错区不同作物残茬覆盖的农田土壤抗风蚀效应进行了试验研究。结果表明:农田地表的风蚀量随地表作物残茬盖度的增大而减小;在高风速下随残茬盖度的增大,其抑制风蚀效果愈加显著。农田土壤的风蚀模数随风速的增大而增加,在12~18 m/s风速时保护性耕作农田风蚀模数比传统耕作农田降低40.42%~77.42%。风蚀模数随地表空气动力学粗糙度的增大而减小。保护性耕作带宽度达到5.25 m以后,具有更加显著的抗风蚀效果。

**关键词:** 土壤风蚀 作物残茬 移动式风洞 风蚀模数

中图分类号: S154.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)06-0038-05

## Testing on Anti-wind Erosion Effect of Soil for Crop Stubble Coverage Farmlands

Zhao Yonglai<sup>1</sup> Chen Zhi<sup>2</sup> Sun Yuechao<sup>1</sup> Wang Ronglian<sup>3</sup>

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

### Abstract

Soil erosion experiment was conducted by the way of field fixed point measurement by taking use of a movable wind erosion tunnel in order to explore anti-wind erosion effect of crop stubble coverage farmland in ecotone between agriculture and animal husbandry in north areas of Yinshan mountain. The results showed that soil wind erosion amount for all of the five kinds of soil surfaces decreased with the increasing of crop stubble coverage and the anti-wind erosion effect was more remarkable with the increasing of crop stubble coverage at the high speeds. The wind erosion module of farmland soil increased with the increasing of wind speed and the reducing rate of wind erosion module of conservation tillage farmland was 40.42% ~ 77.42% with the wind speed of 12 ~ 18 m/s in comparison with conventional tillage farmland. The wind erosion module reduced with the increasing of aerodynamic roughness length. Anti-wind erosion effect of conservation tillage farmland will tend to be more significant when its effective width to resist wind erosion reaches to 5.25 m.

**Key words** Soil erosion, Crop stubble, Movable wind erosion tunnel, Wind erosion module

### 引言

风蚀是一个综合的自然地理过程,受到气候、土

壤、植被和人类等因素的共同制约。目前,农田土壤风蚀的防治主要采取免耕、留茬和秸秆覆盖等保护性耕作措施,以降低近地表风速,削弱气流对土壤表

收稿日期: 2010-08-09 修回日期: 2010-08-31

\* 国家自然科学基金资助项目(40861013)

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

面的剪切力,降低土壤风蚀强度<sup>[1-2]</sup>。国外研究已证实,植被覆盖可以有效抑制土壤风蚀,且直立植被覆盖减少风蚀的效果更好<sup>[3-8]</sup>。国内许多学者研究认为作物残茬覆盖可以大幅度减轻裸露农田的土壤风蚀<sup>[9-15]</sup>。目前,有关保护性耕作防治风蚀的研究以免耕留茬、秸秆覆盖、垄作与传统耕作的对比为主,对作物留茬降低近地面风速,控制土壤风蚀的机制研究较少<sup>[16-18]</sup>。此外,由于多数研究是采用室内风洞模拟试验与野外观测进行的,缺乏磨蚀作用和一般性。

针对保护性耕作防治风蚀研究中存在的局限,本文以内蒙古武川县上秃亥乡保护性耕作项目区不同地表为研究对象,利用移动式风蚀风洞及相关测试设备对传统耕作农田与作物残茬覆盖农田进行试验。分析不同类型和盖度下残茬覆盖农田近地表风蚀模数的变化特征,探讨残茬覆盖地表的抗风蚀机制,确定保护性耕作带的合理宽度,期望为农牧交错区的土壤风蚀防治提供依据。

## 1 研究区概况

研究区位于阴山北麓农牧交错区,该区地处东经 $107^{\circ}17' \sim 117^{\circ}30'$ ,北纬 $40^{\circ}13' \sim 43^{\circ}28'$ <sup>[19]</sup>。阴山北麓农牧交错区大部分土壤为栗钙土,气候为中温带温凉、温和半干旱偏润区和半干旱偏旱大陆性季风气候。年降水量250~400 mm,自东向西递减,7~8月降水量占全年降水量的70%左右,冬春雨雪很少,而且春季一次10 mm以上作物可利用的降水稀少,4~5月连续无降水日数一般在30~50 d以上,加之春风大,干旱机率达64.7%。干旱持续时间长,地域范围广,风沙危害严重,全年8级以上大风日45~84 d,以3~5月最强。春季植被盖度最低,地表裸露面积大,易形成风沙天气,平均每年出现沙尘暴日数9.8~14.6 d<sup>[20]</sup>。

## 2 试验条件与方法

### 2.1 试验条件

试验在武川县上秃亥乡保护性耕作项目区进行。该区属阴山北麓旱作耕地。代表性土壤为栗钙土,多孔隙、沙性,由于气候干燥,地表覆盖少,加之土壤结构性差,极易产生风蚀<sup>[21]</sup>。项目区的保护性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,行距20 cm。保护性耕作带连续4年交替种植油菜与小麦,传统耕作带4年均种植马铃薯。对照秋翻地紧临项目区东侧,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莜麦。

试验选择保护性耕作农田地表与传统耕作农田地表进行试验与分析(图1)。

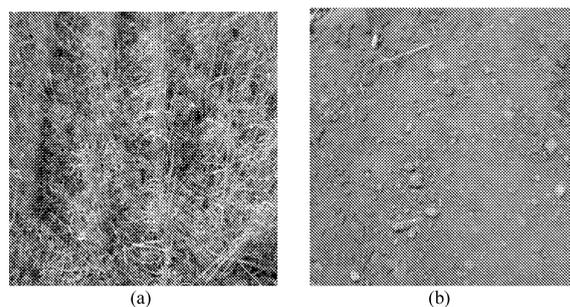


图1 保护性耕作地表和传统耕作地表

Fig. 1 Conservation tillage surface and conventional tillage surface

(a) 保护性耕作地表 (b) 传统耕作地表

### 2.2 试验设计

保护性耕作农田的残茬为:油菜留茬盖度45%,茬高30 cm;小麦留茬盖度65%,茬高20 cm;小麦留茬盖度76%,茬高30 cm;莜麦留茬盖度90%,茬高30 cm。植株平均密度为400株/m<sup>2</sup>,行距为20 cm,各留茬地距地表以下5 cm深度的土壤平均含水率分别为8.65%、9.87%、11.48%、12.03%。传统耕作农田位于武川县保护性项目区东侧,耕作方式为犁翻耕并耙碎,土壤以栗钙土为主,其逐年翻耕使地表土始终裸露越冬,地表盖度几乎为零。距地表以下5 cm深度的土壤平均含水率为5.38%。

由于研究区域起沙风速均在6 m/s左右,故试验时风洞中心风速设计为6、9、12、15、18 m/s 5个等级,这5个风速对应于自然界4~8级风,与试验区的自然风速具有很好的一致性。集沙仪的位置距风洞试验段进口3.00、3.75、4.50、5.25、6.00 m共5个测点处,以T1~T5表示,收集并称量集沙仪20、60、120、180、240、300、400、500、600、700 mm 10个高度的风蚀物。为完成测试系统数据的可靠采集,且能收集到满足进一步分析的土壤风蚀物,风蚀物与风速数据采集时间为10 min,最终用于分析的风速与风蚀量是10 min内采集结果的平均值。

### 2.3 试验设备与方法

试验设备为0FDY-1.2型直流吹气可移动式风蚀风洞和与风洞配套的风速、集沙仪测试系统,1/1000电子天平。试验时将移动式风蚀风洞分别放置传统耕作农田与保护性耕作带的留茬地表上进行试验,放置时使洞体纵向与地表垄向垂直。利用风速采集系统测试风洞中心风速与洞体内流场各高度风速。风洞中心风速 $U$ ,由置于洞体内试验段入口处皮托管测速装置来测定。将风速廓线仪安放在风洞洞体内且距集沙仪600 mm,距风洞内侧壁

300 mm 处,选距地表 50、100、200、400、600 mm 5 点作为风速采集点进行试验。采用与风洞配套的排沙器模拟挟沙风。集沙仪分别安置在风洞轴线上距风洞试验段进口 5 个位置处,取 10 个测试高度的风蚀物。

## 2.4 数据处理

利用 Matlab 7.0 软件对挟沙风吹蚀下集沙仪收集的风蚀量随高度变化在 0~70 cm 之间进行积分,得出移动式风蚀风洞吹蚀 10 min 通过 1 cm 宽、距地表 0~70 cm 高度垂直面的土壤风蚀量

$$Q = \int_0^{70} q dx \quad (1)$$

式中  $Q$ ——1 cm 宽、0~70 cm 高度范围内的土壤风蚀量, g

$q$ ——各高度的土壤风蚀物含量, g/cm<sup>2</sup>

$x$ ——距地表高度, cm

风速数据是在大气层接近中性稳定的条件下试验所得,运用 Matlab 7.0 软件,由最小二乘法拟合得到的风速廓线方程为

$$U_z = A + B \ln Z$$

式中  $A$ 、 $B$ ——回归系数

$Z$ ——测点高度, cm

根据空气动力学粗糙度的定义,令  $U_z = 0$  可求出

$$Z_0 = e^{-A/B} \quad (2)$$

式中  $Z_0$ ——空气动力学粗糙度, cm

每次试验结束后用电子天平称出集沙仪内风蚀物总质量,计算不同地表土壤在不同风速吹蚀下的风蚀模数,以分析和评价土壤的抗风蚀能力。

$$E = m / (St\delta) \quad (3)$$

式中  $E$ ——风蚀模数, g/(m<sup>2</sup>·min)

$m$ ——集沙仪收集到的风蚀物总质量, g

$S$ ——风洞内被吹蚀的土壤面积, m<sup>2</sup>

$t$ ——吹蚀时间, min

$\delta$ ——集沙仪标定系数

集沙仪标定系数  $\delta$  为 0.508%,且不随土壤类型、风洞中心风速、风蚀时间的不同而改变<sup>[22]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 残茬盖度对土壤风蚀量的影响

5 种盖度地表在不同风速下的土壤风蚀量与风蚀总量试验结果如表 1 所示。

由表可知,5 种盖度地表风蚀量都随风速的增大而迅速加大。相同风速下,随着残茬盖度的增加风蚀量呈现下降趋势。同一风速下,苜蓿茬盖度 90% 的地表风蚀量最小,油菜茬盖度 45% 的地表风

表 1 不同残茬盖度地表在挟沙风下的风蚀量

Tab.1 Wind erosion amount of the land surface with different vegetation coverages under sand-carried wind at different wind speeds g

风速/ m·s <sup>-1</sup>	传统 耕作	油菜茬 盖度 45%	小麦茬 盖度 65%	小麦茬 盖度 76%	苜蓿茬 盖度 90%
6	0.580	0.338	0.307	0.114	0.063
9	1.680	0.469	0.801	0.445	0.323
12	3.600	1.858	1.820	1.243	0.813
15	4.840	2.798	2.373	2.370	1.771
18	5.230	4.200	4.653	3.317	3.116
总计	15.930	9.625	9.992	7.489	6.086

蚀量较小,传统耕作农田地表风蚀量最大。传统耕作农田地表的总风蚀量明显大于具有残茬覆盖农田地表的总风蚀量。油菜茬盖度 45% 地表、小麦茬盖度 65% 地表、小麦茬盖度 76% 地表与苜蓿茬盖度 90% 地表的总风蚀量较传统耕作农田地表分别降低了 39.58%、37.28%、52.99% 和 61.79%。说明增加地表残茬盖度可以明显降低土壤风蚀量。在低风速下,风蚀量随残茬盖度变化的增量不太明显,随着风速的加大,增加地表残茬盖度对抑制风蚀的效果尤为显著。其主要原因是残茬盖度可以有效地隔离风力对土壤的直接作用。其次,具有直立残茬覆盖的地表,由于直立残茬可通过吸收地表风动量来降低对下垫面的剪切力,从而迅速降低近地表的流速,达到有效抑制风蚀的效果。

### 3.2 风蚀模数与风速变化关系

不同盖度下风速与风蚀模数关系如图 2 所示。由图可知,传统耕作农田与保护性耕作农田地表的的风蚀模数均随风速的增加呈不同程度的增加,传统耕作农田风蚀模数的增加幅度较保护性耕作农田大。传统耕作农田,当风速达到 9 m/s 时风蚀模数变化明显,且随着风速的加大,其加大趋势增强;当风速大于 15 m/s 时其增加趋于平缓。这是因为土壤表面要受到风的剪切力作用并且贴地表运动的沙粒会磨蚀地表,使风蚀模数相应增加。挟沙风中大量的沙尘,在速度相同的条件下其能量比净风要大得多,挟沙能力也远远大于净风。在大风速下风蚀模数变化趋缓说明随着风速的加大,更多的土壤颗粒开始运动,对下垫面的磨蚀作用加强,风蚀量急剧增加,同时部分颗粒得到更大的动能,互相碰撞并产生跃移,一些细小颗粒出现悬移运动。单位颗粒在一定范围撞击地表的次数就会减少,其运行的高度有所提升,导致贴地表的沙通量减少<sup>[23]</sup>。吹蚀颗粒对地表的影响作用趋于减弱,因而出现风蚀模数在高风速段趋缓的现象。

在 12、15、18 m/s 3 个风速下,小麦茬盖度 76% 的保护性耕作农田与传统耕作农田相比,风蚀模数分别降低了 77.42%、63.41%、40.42%。说明传统耕作农田在风速大于 9 m/s 时,抗风蚀能力很弱。保护性耕作农田风蚀模数随风速的变化始终较平缓。可见在阴山北麓农牧交错干旱半干旱地区实施保护性耕作可以有效降低风蚀模数从而达到抑制风蚀荒漠化的扩展。

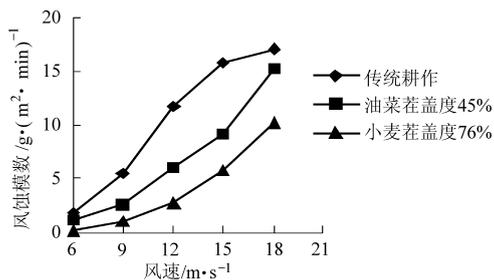


图 2 农田地表在不同风速下的风蚀模数

Fig. 2 Wind erosion module at different wind speeds in tillage farmland

### 3.3 风蚀模数与空气动力学粗糙度及风速的关系

试验分析了小麦茬盖度 76% 的保护性耕作农田在 18 m/s 风速下距风洞试验段进口 5 个测点处的风蚀模数和空气动力学粗糙度,其结果如图 3 所示。

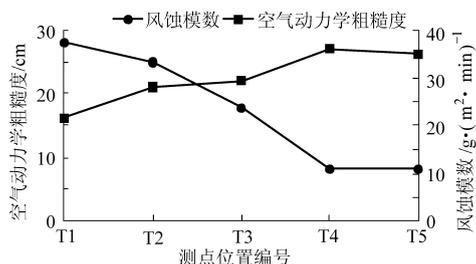


图 3 空气动力学粗糙度与风蚀模数的关系曲线

Fig. 3 Relationships between aerodynamic roughness length and wind erosion modulus

由图可知,各测点处的空气动力学粗糙度逐渐增大,即随着距风洞试验段气流进口距离越近,空气动力学粗糙度越小;反之,空气动力学粗糙度越大。说明随着保护性耕作农田残茬行数的增加,残茬覆盖地表对风的阻抗作用加大,从而有效提高了抵抗风蚀的能力。风蚀模数受地表空气动力学粗糙度的影响非常明显,地表空气动力学粗糙度越小,风蚀模数越大。其中,测点 T4 处的空气动力学粗糙度比 T5 处大 2.41%,相应的风蚀模数较 T5 处小 0.4%。由此可见,在 T4、T5 两测点处的抗风蚀效果几乎一致。

以小麦残茬覆盖农田为研究对象对保护性耕作带合理带宽进行试验与分析,其结果如图 4 所示。

由图可以看出,各测点处的风蚀模数均随着风速的增大而增大,同一风速下风蚀模数由大到小顺

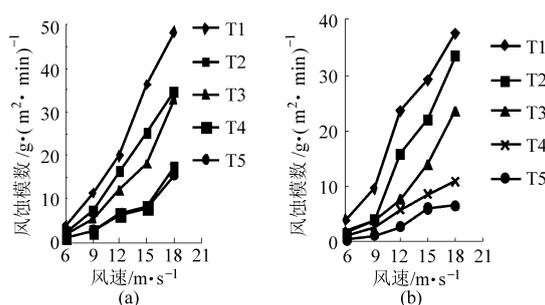


图 4 不同盖度农田风速和风蚀模数的关系曲线

Fig. 4 Relationship between windspeeds and wind erosion module of different vegetation coverages farmland

(a) 小麦茬盖度 65% (b) 小麦茬盖度 76%

序为 T1、T2、T3、T4、T5。说明保护性耕作带宽越小,其抗风蚀效应越弱。随着保护性耕作带带宽的加大,可将大量的风蚀物截留下从而达到有效抑制风蚀的效果。同一风蚀模数下,各测点处风速由小到大的顺序为  $v_{T1}$ 、 $v_{T2}$ 、 $v_{T3}$ 、 $v_{T4}$ 、 $v_{T5}$ ,且风蚀模数越小,相应测点对应的风速只有在 T4 和 T5 处最大。充分说明保护性耕作带的带宽越大,其风蚀模数越低;在 T4 或 T5 测点处,达到同一风蚀模数,其能够抵抗的风蚀风速也很大。残茬盖度越大,风蚀模数越小。风速为 18 m/s 条件下,小麦茬盖度 76% 和 65% 时 T1 ~ T5 的 5 个测点相比,风蚀模数分别下降了 22.63%、4.12%、28.32%、37.27%、28.72%。说明残茬覆盖仍是有效控制风蚀的主要因素之一,残茬盖度的大小决定着土壤风蚀的强弱。残茬覆盖的地上部分通过增加气固界面粗糙度而减小作用在地表的侵蚀风力,而残茬覆盖的地下部分通过固结土壤改善了土壤的结构,从而增强土壤的抗风蚀能力。对比图 4a 和 4b 中 T4 和 T5 两个测点的风蚀模数变化曲线,不难发现这两条曲线非常接近,T4 和 T5 两测点风蚀模数平均差值分别为  $0.684 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$  和  $0.858 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$ 。可见当距风洞试验段进口位置增加到 5.25 m 以后,即保护性耕作带宽度达到 5.25 m 以后,无论在低风速还是在高风速下,风蚀模数的变化曲线已趋于一致。说明经过 26 行、5.25 m 宽度的保护性耕作带留茬地表后,风蚀模数的变化已基本达到平衡状态。

## 4 结论

(1) 农田地表的风蚀量随地表作物残茬盖度的增大而减小,在高风速下抑制风蚀效果愈加显著。因此增加地表残茬覆盖量可以明显降低土壤风蚀量。

(2) 农田土壤的风蚀模数随风速的增大而增加,在 12 ~ 18 m/s 风速时保护性耕作农田风蚀模数

较传统耕作农田降低 40.42% ~ 77.42%。风蚀模数随地表空气动力学粗糙度的增大而减小。

增大而增加,加大保护性耕作带带宽具有明显降低土壤风蚀的作用。当保护性耕作带宽度达到 5.25 m 以后,具有更加显著的抗风蚀效果。

(3) 风筒内各测点处的风蚀模数均随着风速的

### 参 考 文 献

- 1 董光荣,李长治,金炯,等. 关于土壤风蚀风洞试验的若干结果[J]. 科学通报,1987,32(2):297~301.  
Dong Guangrong, Li Changzhi, Jin Jiong, et al. Several results about wind erosion from wind tunnel experiments[J]. Chinese Science Bulletin,1987,32(2):297~301. (in Chinese)
- 2 辜松,小松崎将一,森泉昭治,等. 覆盖作物与耕作法对土壤性质的影响[J]. 农业机械学报,2005,36(7):37~40.  
Gu Song, Komatsuzaki Masakazu, Shoji Moriizumi, et al. Influence of cover crops and tillage treatment on soil properties[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005,36(7):37~40. (in Chinese)
- 3 Englehorn C L, Zingg A W, Woodruff N P. The effect of plant residue cover and clod structure on soil losses by wind[J]. Soil Science Society of America Journal, 1952,16(1):29~33.
- 4 Fryrear D W, Skidmore E L. Methods of controlling wind erosion[M] // Follett R, Stewart B A. Soil Erosion and Crop Productivity. Madison, WI: ASA, CSSA, SSSA,1985:443~457.
- 5 Lyles L, Allison B E. Equivalent wind-erosion protection from selected crop residues[J]. Transactions of the ASAE,1981,24(2):405~408.
- 6 Van den Ven TAM, Fryrear D W, Spaan W S. Vegetation characteristics and soil loss by wind[J]. Journal of Soil Water Conservation,1989,44(4):347~349.
- 7 Siddoway F H, Chepil W S, Armbrust D V. Effect of kind, amount, and placement of residue on wind erosion control[J]. Transactions of the ASAE,1965,8(3):327~331.
- 8 Unger P W. Managing agricultural residues[M]. Boca Raton: Lewis Publishers,1994:289.
- 9 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 Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(7):64~67. (in Chinese)
- 10 孙悦超,麻硕士,陈智,等. 北方农牧交错区草原地表风蚀原位测试技术[J]. 农业机械学报,2010,41(6):49~52.  
Sun Yuechao, Ma Shuoshi, Chen Zhi, et al. In situ testing on soil erosion of grassland surface in the northern farming-pastoral zone[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(6):49~52. (in Chinese)
- 11 妥德宝,段玉,赵沛义. 带状留茬间作对防治干旱地区农田风蚀沙化的生态效应[J]. 华北农学报,2002,17(4):63~67.  
Tuo Debao, Duan Yu, Zhao Peiyi. Ecological effect of intercropping strips keeping stubble on preventing field from wind erosion in dryland farming areas[J]. Acta Agriculture Boreali-Sinic,2002,17(4):63~67. (in Chinese)
- 12 赵举,郑大玮,妥德宝. 阴山北麓农牧交错带带状留茬间作防风蚀技术[J]. 干旱地区农业研究,2002,20(2):5~9.  
Zhao Ju, Zheng Dawei, Tuo Debao. Study on the technique of strip intercropping with stubble for controlling wind erosion at ecotone in the north area of the Yinshan mountains[J]. Agricultural Research in the Arid Areas,2002,20(2):5~9. (in Chinese)
- 13 赵沛义,妥德宝,郑大玮. 带状留茬间作减轻旱作农田土壤风蚀的生态效应研究[J]. 中国农学通报,2007,23(10):171~174.  
Zhao Peiyi, Tuo Debao, Zheng Dawei. The ecological effect of strip inter cropping together with stubble-keeping on reducing wind erosion in dry farming land[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin,2007,23(10):171~174. (in Chinese)
- 14 秦红灵,高旺盛,马月存. 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. 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)
- 15 陈智,麻硕士,范贵生. 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. Effect of wind erosion resistance of soil for wheat and potato strip intercropping farm land[J]. Transactions of the CSAE,2007,23(3):51~54. (in Chinese)
- 16 冯晓静,高焕文,李洪文,等. 北方农牧交错带风蚀对农田土壤特性的影响[J]. 农业机械学报,2007,38(5):51~54.  
Feng Xiaojing, Gao Huanwen, Li Hongwen, et al. Effect of wind erosion in agro-pastoral region on soil characteristics[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(5):51~54. (in Chinese)

## 4 结论

(1)变矩器去掉内环后,虽然泵轮出口和涡轮入口附近的高压区及高速流区减小,但在各叶轮交界面循环流量具有更大的过流面积,流体的循环流量增大,涡轮叶片被冲击范围增大,变矩器将能吸收更多发动机功率及更大的转矩输出。

(2)不同扁平率时,各性能参数的变化是不同

的。无内环变矩器的变矩系数、效率及循环流量将随着扁平率的下降而下降,而在低速比工况,泵轮容量系数随着扁平率的降低而升高。

(3)无内环扁平化变矩器在基本不降低其总体性能的前提下,能够有效减小变矩器的轴向和径向尺寸,节省了传动系空间,但还有待于进一步优化无内环空间扭曲叶片形状,以提高效率。

## 参 考 文 献

- 1 Toru Ochi, Hiroaki Takeuchi, Hiromichi Kimura, et al. Development of a super flat torque converter for the new toyota FWD6—speed automatic transaxle[C]. SAE Paper 2006-01-0149,2006.
- 2 Tomaz Kietlinski, Michael Fingerman. 248 mm elliptical torque converter from daimler chrysler corporation[C]. SAE Paper 2007-01-0241,2007.
- 3 Ejiri E, Kubo M. Influence of the flatness ratio of an automotive torque converter on hydrodynamic performance[J]. ASME Journal of Fluids Engineering,1999,121(3): 614~620.
- 4 李忠禄,刘冀察. 一种新的液力变矩器循环环构想及其设计方法[J]. 工程机械,2005(1):48~49.
- 5 刘春宝. 轿车扁平化液力变矩器研究[D]. 长春:吉林大学,2009.  
Liu Chunbao. Research on flat hydrodynamic torque converter for passenger car[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- 6 刘春宝,马文星,褚亚旭. 多流动区域耦合算法在液力元件中的应用[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(6):1342~1347.  
Liu Chunbao, Ma Wenxing, Chu Yaxu. Application coupling algorithm for multi-flow-region in hydrodynamic components[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008,38(6):1342~1347. (in Chinese)
- 7 刘春宝,朱喜林,马文星. 轿车液力变矩器扁平率研究[J]. 农业机械学报,2010,41(10):23~27.  
Liu Chunbao, Zhu Xilin, Ma Wenxing. Flatness ratio of flat hydrodynamic torque converter for passenger car [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(10):23~27. (in Chinese)

(上接第42页)

- 17 臧英,高煊文. 国外农田风蚀发生机理与防治技术的研究[J]. 农业工程学报,2002,18(3):195~198.  
Zang Ying, Gao Huanwen. Research on occurrence mechanism and control technology of wind erosion in agricultural lands [J]. Transactions of the CSAE,2002,18(3):195~198. (in Chinese)
- 18 哈斯. 坝上高原土壤不可蚀性颗粒与耕作方式对风蚀的影响[J]. 中国沙漠,1994,14(4):92~97.  
Hasi Erdon. Influence of non-erodible clods and tillage practice on wind erosion over Bashang plateau[J]. Journal of Desert Research,1994,14(4):92~97. (in Chinese)
- 19 Cheng X. Rethinking of the transition zone between agricultural and pastoral areas, and the innovation of industries of grass and livestock[J]. Journal of Grasses Industry,2001,10(Supp.1): 27~35.
- 20 信乃谕. 中国北方旱农区域治理与发展[M]. 北京:中国农业科技出版社,1997: 86~88.
- 21 赵彩霞. 阴山北麓农牧交错带防治风蚀沙化的恢复生态学研究[D]. 北京:中国农业大学,2005.  
Zhao Caixia. Study on restoration ecology of resisting and controlling wind erosion in the agro-pastoral ecotone of the north foot of Yinshan mountain[D]. Beijing: China Agricultural University,2005. (in Chinese)
- 22 赵永来. 利用移动式风洞测试评估植被盖度对土壤风蚀的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2006.  
Zhao Yonglai. Test and evaluation on influences of vegetation coverage on soil wind erosion by means of the movable wind tunnel[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University,2006. (in Chinese)
- 23 丁国栋. 风沙流结构的风洞实验研究[J]. 内蒙古林学院学报,1994,16(1):40~46.  
Ding Guodong. Experimental study on wind sand flow in wind tunnel[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry College, 1994, 16(1):40~46. (in Chinese)